



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم



Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique

# MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

## MASTER EN ELECTROTHERNIQUE

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par

BENAOUINA OUSSAMA

BENGRIT MOKHTAR

### Intitulé du sujet

Modélisation et Simulation 2D-3D du Contrôle Non Destructif (CND) par  
L'utilisation de la Technique de Flux de Fuites Magnétique (MFL) dans le cas  
Linéaire et Non Linéaire

Soutenu le 30/06/2024 devant le jury composé de :

Président : BENAOUALI MOHAMED MAA

Université de MOSTAGANEM

Examineur : CHAOUCH ABDELLAH Pr

Université de MOSTAGANEM

Encadrant : OMARI HAMZA MCA

Université de MOSTAGANEM

Année Universitaire 2023/2024

# Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu tout-puissant qui nous donne de la foi, du courage et de la patience durant toutes nos années d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont consentis afin que nous puissions terminer nos études. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrant, Monsieur OMARI HAMZA, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au chef de département et à tous nos professeurs qui nous ont enseigné et qui nous font part par leurs compétences, nous ont soutenu et guidé durant nos études. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. **MERCI !**

# Dédicaces

Avant tout, je remercie « ALLAH » qui m'a donné la santé, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail et de terminer ma carrière éducative à faculté des sciences et des technologies. Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à Ma très chère mère, ma vie AKERMI MOKHTARIA qui m'a donné tout ce qu'elle avait afin de me rendre heureux.

C'est la mère qui se sacrifie pour ses enfants. Mon cher père, ma force BENGRIT NOUR ELDDINE, Mon soutien dans la vie. Je vous aime, et j'espère que vous êtes fiers de moi, mes sœurs WAFAA, IMANE, RANIA. Toute la famille BENGRIT et AKERMI, Qui m'a guidée durant la réalisation de ce travail, mon cher encadrant de mémoire, M. OMARI HAMZA, merci. Je vous souhaite tout le meilleur et le succès dans votre vie. Mon bras droit BENCHENDIKH SALAH EDDINE OUSSAMA Merci pour vos efforts et votre soutien, je te souhaite du bonheur dans ta vie. Mes frères Mohamed et Ibrahim, YOUNES, je vous souhaite une meilleure vie pleine de succès. L'amitié est l'attachement de l'âme pour l'âme, fondé sur les qualités de l'esprit et du cœur. Tous mes collègues du secteur. Tous nos professeurs qui nous ont appris. Et enfin, à ma diligence et ma volonté, merci à moi. ELHAMDOULILLAH

**[Bengrit Mokhtar]**

À mes chers parents,

Votre soutien inconditionnel, votre amour et vos encouragements ont été les fondations solides sur lesquelles j'ai pu construire ce mémoire. Votre patience et vos sacrifices n'ont jamais cessé de m'inspirer et de me motiver à donner le meilleur de moi-même. Ce travail est dédié à vous, pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi. Merci du fond du cœur pour tout.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle,

**[Benaouina Oussama]**

# ملخص

يركز مشروع التخرج هذا على تطبيق الفحص غير المدمر باستخدام تقنية التدفق المغناطيسي المتسرب (MFL) في تفتيش الهياكل المعدنية. تعتبر تقنية التدفق المغناطيسي المتسرب تقنية متقدمة تتيح الكشف المبكر عن العيوب الداخلية، مثل التآكل والشقوق، دون إتلاف الهيكل. تستكشف هذه الدراسة المبادئ الأساسية لتقنية MFL ، وتطبيقاتها العملية في مختلف القطاعات الصناعية، فضلاً عن مزاياها من حيث التكلفة والكفاءة مقارنة بأساليب الفحص التقليدية. الهدف الرئيسي هو توضيح فعالية وموثوقية تقنية التدفق المغناطيسي المتسرب كأداة أساسية لضمان سلامة وأمان البنى التحتية المعدنية الحيوية.

## Résumé

Ce projet de fin d'étude se concentre sur l'application du contrôle non destructif par flux de fuite magnétique (MFL) dans l'inspection des structures métalliques.

Le MFL est une technique avancée permettant la détection précoce des défauts internes, tels que la corrosion et les fissures, sans endommager la structure. Cette étude explore les principes fondamentaux du MFL, ses applications pratiques dans divers secteurs industriels, ainsi que ses avantages en termes de coût et d'efficacité par rapport aux méthodes conventionnelles d'inspection.

L'objectif principal est d'illustrer l'efficacité et la fiabilité du MFL en tant qu'outil essentiel pour assurer l'intégrité et la sécurité des infrastructures métalliques critiques.

## Abstract

This final project focuses on the application of non-destructive magnetic flux leakage (MFL) testing in the inspection of metal structures. MFL is an advanced technique for early detection of internal defects, such as corrosion and cracks, without damaging the structure. This study explores the fundamental principles of MFL, its practical applications in various industrial sectors, as well as its cost and efficiency advantages over conventional inspection methods.

The main objective is to illustrate the efficiency and reliability of the MFL as an essential tool for ensuring the integrity and security of critical metal infrastructures.

### Mots clés :

Contrôles Non destructifs (CND), Flux de Fuite Magnétique (MFL), Equations de Maxwell, Méthode des Eléments Finis (MEF), Electromagnétisme.

# Liste des symboles

<b>Symbole</b>	<b>Quantité</b>	<b>Unité</b>
<b>E</b>	<b>Intensité du champ électrique</b>	<b>[V/m]</b>
<b>H</b>	<b>Intensité du champ magnétique</b>	<b>[A/m]</b>
<b>D</b>	<b>Densité de flux électrique</b>	<b>[C/m<sup>2</sup>]</b>
<b>B</b>	<b>Densité de flux magnétique</b>	<b>[T]</b>
<b>J</b>	<b>Densité de courant</b>	<b>[A/m<sup>2</sup>]</b>
$\vec{A}$	<b>Potentiel vecteur magnétique</b>	<b>[Tm]</b>
$\epsilon$	<b>Permittivité électrique</b>	<b>[F/m]</b>
$\mu$	<b>Perméabilité magnétique</b>	<b>[H/m]</b>
$\sigma$	<b>Conductivité électrique</b>	<b>[S/m]</b>
<b>q</b>	<b>Charge électrique</b>	<b>[C]</b>
<b>V</b>	<b>Vitesse</b>	<b>[m/s]</b>
<b>v</b>	<b>Réductivité magnétique</b>	<b>[m/H]</b>

# Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>CND</b>	<b>Contrôle Non Destructif</b>
<b>MFL</b>	<b>Magnetic Flux Leakage (flux de fuite magnétique)</b>
<b>MEF</b>	<b>Méthode des Eléments Finis</b>
<b>EDP</b>	<b>Equations aux Dérivées Partielles</b>
<b>FEMM</b>	<b>Finite Element Method Magnetic</b>
<b>CF</b>	<b>Courants de Foucault</b>
<b>MDF</b>	<b>Méthode des Différences Finis</b>
<b>MVF</b>	<b>Méthode des Volumes Finis</b>

# Sommaire

Remerciements .....	2
Dédicaces.....	3
ملخص.....	4
Résumé.....	4
Abstract.....	4
Liste des symboles .....	4
Liste des abréviations .....	6
Sommaire .....	7
Introduction Générale .....	11

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

<b>I.1 Définition .....</b>	<b>19</b>
<b>I.2 Principe de la détection d'un défaut dans le CND [2] .....</b>	<b>19</b>
<b>I.3 Types et Origines des Défauts .....</b>	<b>20</b>
I.3.1 Hétérogénéités et Défauts .....	20
I.3.2 Défauts de Surface .....	20
I.3.2.1 Défauts Ponctuels.....	20
I.3.2.2 Défauts D'aspect.....	21
I.3.3 Défauts Internes .....	21
<b>I.4 Exploration des Méthodes de CND .....</b>	<b>21</b>
I.4.1 Examen Visuel .....	22
I.4.2 Ressuage .....	23
I.4.2.1 Domaine d'application de Ressuage .....	23
I.4.3 Magnétoscopie .....	24
I.4.4 Ultrasons .....	24
I.4.5 Radiographie.....	26
I.4.6 Courants de Foucault .....	27
I.4.7 Flux de Fuite Magnétique (Magnetic Flux Leakage).....	27
I.4.7.1 Principe de MFL .....	27
I.4.7.2 Avantages et Inconvénients du CND par Flux de Fuite Magnétique .....	29
<b>I.5 Les Domaines d'application du CND .....</b>	<b>29</b>
<b>I.6 Capteurs Magnétiques utilisés au CND .....</b>	<b>30</b>
I.6.1 Capteurs Inductifs .....	30
I.6.1.1 Capteurs à Effet Hall.....	30

I.6.1.2	Les Magnétorésistances [13].....	31
I.6.1.3	Capteur Fluxgate .....	32
<b>I.7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>33</b>

## **CHAPITRE II : MODÉLISATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET FORMULATIONS ELEMENTS FINIS**

<b>II.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>II.2</b>	<b>Phénomène Physique .....</b>	<b>35</b>
<b>II.3</b>	<b>Lois d'Électromagnétisme .....</b>	<b>36</b>
II.3.1	Équations de Maxwell.....	36
II.3.2	Relations des Milieux .....	37
II.3.3	Conditions de Passage entre Deux Milieux Différents .....	38
II.3.4	Conditions aux Limites .....	38
<b>II.4</b>	<b>Formulation du champ Électromagnétique.....</b>	<b>39</b>
II.4.1	Formulation Magnétostatique et Hypothèses Simplificatrices.....	39
II.4.1.1	Formulation en potentiel vecteur magnétique <b>A</b> .....	40
<b>II.5</b>	<b>Méthodes de Résolution.....</b>	<b>41</b>
II.5.1	Méthodes Numériques .....	41
II.5.1.1	Méthode des Différences Finies.....	41
II.5.1.2	Méthode des Volumes Finis .....	41
<b>II.6</b>	<b>Méthode des Éléments finis (MEF) .....</b>	<b>41</b>
II.6.1	Principe de la MEF .....	42
II.6.2	Étapes de résolution par la MEF .....	43
II.6.3	Forme de la Matrice Élémentaire.....	44
II.6.4	Résolution du Système Algébrique.....	44
II.6.5	Fonctions d'interpolation et Expression d'Approximation .....	45
II.6.6	Forme discrète de la formulation en potentiel vecteur magnétique <b>A</b> .....	45
<b>II.7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>46</b>

## **CHAPITRE III : SIMULATION 2D-3D ET ANALYSE DES RÉSULTATS**

<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>48</b>
<b>III.2</b>	<b>Simulation 2D : (En utilisant FEMM).....</b>	<b>48</b>
III.2.1	Présentation du Logiciel FEMM.....	48
III.2.2	La Géométrie du Dispositif étudié .....	50
III.2.2.1	Les Propriétés Physiques Principales.....	52
III.2.2.2	Dimensions Principales du Dispositif étudié .....	52



III.2.3	1 <sup>ère</sup> Simulation .....	53
III.2.3.1	Cas linéaire.....	53
III.2.3.1.a)	Sans Défaut .....	53
III.2.3.1.b)	Avec défaut .....	57
III.2.3.2	Effet de variation des dimensions du défaut sur l'énergie magnétique et la densité de flux magnétique (Linéaire).....	60
III.2.3.2.a)	Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	60
III.2.3.2.b)	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	62
III.2.3.2.c)	Effet de changement de la forme du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	63
III.2.4	2 <sup>ème</sup> Simulation .....	64
III.2.4.1	Cas non-Linéaire .....	65
III.2.4.1.a)	Sans défaut .....	66
III.2.4.1.b)	Avec défaut .....	69
III.2.4.2	Effet de variation des dimensions du défaut sur l'énergie magnétique et la densité de flux magnétique (Non Linéaire).....	72
III.2.4.2.a)	Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	72
III.2.4.2.b)	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	73
III.2.5	Interprétation des résultats donnée par Femm .....	75
<b>III.3</b>	<b>Simulation 3D : (En utilisant COMSOL multiphysics) .....</b>	<b>75</b>
III.3.1	Etapes de simulation .....	75
III.3.1.1	Ouvrir COMSOL Multiphysics.....	75
III.3.1.2	Créer un nouveau modèle .....	75
III.3.1.3	Sélectionner Physiques Interfaces.....	75
III.3.1.4	Définir la géométrie en 3D.....	76
III.3.1.5	Configurer les propriétés du matériau.....	76
III.3.1.6	Définir les conditions aux limites .....	76
III.3.1.7	Définir les paramètres du maillage .....	76
III.3.1.8	Définir les équations du champ magnétique .....	76
III.3.1.9	Configurer l'étude .....	76
III.3.1.10	Spécifier les paramètres du solveur.....	76
III.3.1.11	Lancer la simulation.....	76
III.3.2	Simulation .....	77

III.3.2.1	Dimensions du Dispositif Etudié .....	77
III.3.2.2	Paramètres d'entrée .....	78
III.3.2.3	Configuration du dispositif étudié.....	80
III.3.2.4	Réglage des paramètres de l'aimant.....	82
III.3.2.5	Réglage des paramètres du capteur.....	83
III.3.2.6	Configuration d'étude .....	84
III.3.3	Résultats de Simulation.....	84
III.3.3.1	Cas sans défaut.....	86
III.3.3.2	Cas avec défaut .....	89
III.3.3.2.a)	Interprétation des Résultats des Figures.....	92
a.	Sans défaut .....	92
b.	Avec défaut .....	92
III.3.3.2.b)	Interprétation des Résultats des Courbes .....	94
III.3.4	Interprétation des résultats donnée par COMSOL .....	94
<b>III.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>94</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>94</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>97</b>

# Liste des Figures

<b>Figure I.1</b> Principe du contrôle non destructif.....	20
<b>Figure I.2</b> Exemple du CND par l'examen visuel.....	22
<b>Figure I.3</b> Principe du ressuage.....	23
<b>Figure I.4</b> Principe de la Magnétoscopie.....	24
<b>Figure I.5</b> Principe du contrôle par ultrasons.....	25
<b>Figure I.6</b> Principe du contrôle par radiographie.....	26
<b>Figure I.7</b> Principe du contrôle par CF.....	27
<b>Figure I.8</b> Principe du contrôle par flux de fuite magnétique.....	28
<b>Figure I.9</b> Photo de l'appareil du CND par flux de fuite magnétique (inspection des plaques).....	28
<b>Figure I.10</b> Photo de l'appareil du CND par flux de fuite magnétique (inspection des pipelines).....	29
<b>Figure I.11</b> Principe des capteurs à effet Hall.....	31
<b>Figure I.12</b> Évolution de l'aimantation des couches d'une GMR en fonction du champ magnétique appliqué.....	32
<b>Figure I.13</b> Exemples des géométries de fluxgate.....	33
<b>Figure II.1</b> Exemple illustratif du phénomène physique.....	35
<b>Figure II.2</b> Exemples de maillages.....	42
<b>Figure II.3</b> Les étapes de résolution par MEF.....	44
<b>Figure III.1</b> Les boutons de création dans FEMM.....	48
<b>Figure III.2</b> Modes du post processeur FEMM.....	49
<b>Figure III.3</b> Boutons de maillage et d'analyse du logiciel FEMM.....	49
<b>Figure III.4</b> Les différentes étapes de calcul sous FEMM.....	50
<b>Figure III.5</b> Les régions du dispositif étudié tracée par FEMM.....	51
<b>Figure III.6</b> La géométrie du dispositif présenté dans le cas linéaire « Sans défaut ».....	54
<b>Figure III.7</b> Le maillage du domaine d'étude dans le cas linéaire « Sans défaut ».....	54
<b>Figure III.8</b> Les lignes de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut ».....	55
<b>Figure III.9</b> La densité de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut ».....	55
<b>Figure III.10</b> Les flèches de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut ».....	56
<b>Figure III.11</b> La géométrie du dispositif étudié dans le cas linéaire « Avec défaut ».....	57
<b>Figure III.12</b> Le maillage du domaine d'étude dans le cas linéaire « Avec défaut ».....	58
<b>Figure III.13</b> Les lignes de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut ».....	58
<b>Figure III.14</b> La densité de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut ».....	59
<b>Figure III.15</b> Les flèches de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut ».....	59

<b>Figure III.16</b>	La variation de l'énergie magnétique en fonction de la longueur du défaut.....	61
<b>Figure III.17</b>	La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la longueur du défaut.....	61
<b>Figure III.18</b>	La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur du défaut.....	62
<b>Figure III.19</b>	La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la profondeur du défaut.....	63
<b>Figure III.20</b>	Le courbe d'évolution de l'induction en fonction de l'intensité du champ magnétique.....	65
<b>Figure III.21</b>	La tableau d'évolution de l'induction B en fonction de l'intensité du champ magnétique H.....	65
<b>Figure III.22</b>	La géométrie du dispositif présenté dans le cas non linéaire « Sans défaut ».....	66
<b>Figure III.23</b>	Le maillage du domaine d'étude dans le cas non-linéaire « Sans défaut ».....	67
<b>Figure III.24</b>	Les lignes de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut ».....	67
<b>Figure III.25</b>	La densité de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut ».....	68
<b>Figure III.26</b>	Les flèches de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut ».....	68
<b>Figure III.27</b>	La géométrie du dispositif présenté dans le cas non linéaire « Avec défaut ».....	69
<b>Figure III.28</b>	Le maillage du domaine d'étude dans le can non-linéaire « Avec défaut ».....	70
<b>Figure III.29</b>	Les lignes de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut ».....	70
<b>Figure III.30</b>	La densité de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut ».....	71
<b>Figure III.31</b>	les flèches de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut ».....	71
<b>Figure III.32</b>	La variation de l'énergie magnétique en fonction de la longueur du défaut.....	72
<b>Figure III.33</b>	La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la longueur du défaut.....	73
<b>Figure III.34</b>	La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur.....	74
<b>Figure III.35</b>	La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur.....	74
<b>Figure III.36</b>	La géométrie du dispositif étudié avec COMSOL.....	77
<b>Figure III.37</b>	Affichage des Paramètres d'entrée du dispositif étudié avec COMSOL.....	78
<b>Figure III.38</b>	Affichage des Paramètres d'entrée du dispositif étudié (en mode plein écran).....	78
<b>Figure III.39</b>	Affichage des matériaux utilisés dans notre dispositif par COMSOL.....	79
<b>Figure III.40</b>	Affichage des matériaux utilisés dans notre dispositif (en plein écran).....	80
<b>Figure III.41</b>	Les limites du domaine étudié (Conditions aux limites).....	81
<b>Figure III.42</b>	Affichage des interfaces physiques utilisées dans notre dispositif sur COMSOL.....	81
<b>Figure III.43</b>	Affichage des paramètres du nord et du sud de nos aimants utilisés sur COMSOL.....	82
<b>Figure III.44</b>	Affichage du domaine des aimants utilisés (en plein écran).....	82
<b>Figure III.45</b>	La géométrie du capteur utilisé.....	83
<b>Figure III.46</b>	Affichage de l'interface physique utilisée pour le capteur sur COMSOL.....	83
<b>Figure III.47</b>	Affichage du maillage du domaine étudié.....	84
<b>Figure III.48</b>	Affichage du maillage du dispositif étudié dans le cas « Sans défaut ».....	86
<b>Figure III.49</b>	Affichage des lignes de flux magnétique dans le cas « Sans défaut ».....	86
<b>Figure III.50</b>	Affichage des lignes de flux magnétique En 3D dans le cas « Sans défaut ».....	87
<b>Figure III.51</b>	Affichage des flèches de flux magnétique dans le cas « Sans défaut ».....	87
<b>Figure III.52</b>	Affichage de la densité de flux magnétique dans le cas « Sans défaut ».....	88

<b>Figure III.53</b> Affichage de maillage du dispositif étudié dans le cas « Avec défaut ».....	89
<b>Figure III.54</b> Affichage des lignes de flux magnétique dans le cas « Avec défaut ».....	89
<b>Figure III.55</b> Affichage des lignes de flux magnétique En 3D dans le cas « Avec défaut ».....	90
<b>Figure III.56</b> Affichage des flèches de flux magnétique dans le cas « Avec défaut ».....	90
<b>Figure III.57</b> Affichage zoomé des flèches de flux magnétique dans le cas « Avec défaut ».....	91
<b>Figure III.58</b> Affichage zoomé de la densité de flux magnétique dans le cas « Avec défaut ».....	91
<b>Figure III.59</b> Affichage zoomé de la densité de flux magnétique dans le cas « Avec défaut ».....	92
<b>Figure III.60</b> La variation de la densité de flux magnétique par rapport à la position du capteur.....	93
<b>Figure III.61</b> La variation de la différence de potentiel aux bornes du capteur.....	93

# Listes des Tableaux

<b>Tableau III-1.</b> Différentes régions du dispositif et leurs matériaux.....	52
<b>Tableau III-2.</b> Les propriétés physiques principale des matériaux du dispositif.....	52
<b>Tableau III-3.</b> Dimensions principales du dispositif.....	53
<b>Tableau III-4.</b> Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.....	60
<b>Tableau III-5.</b> Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale. ....	62
<b>Tableau III-6.</b> Effet de la variation de la forme du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale. ....	64
<b>Tableau III-7.</b> Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale. ....	72
<b>Tableau III-8.</b> Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale. ....	73
<b>Tableau III-9.</b> Les Démentions du Dispositif étudié par COMSOL.....	77
<b>Tableau III-10.</b> Les sorties du maillage donnée par COMSOL.....	85



## Introduction Générale

Depuis de nombreuses années, les industriels ont accordé une grande importance à la sécurité de leurs installations et équipements dans leurs recherches. Par exemple, dans les domaines sensibles comme le nucléaire et l'aéronautique, il est crucial de déterminer l'état d'usure d'une pièce (comme un tube de générateur de vapeur ou une aile d'avion) sans la détériorer. C'est donc dans un environnement industriel où les normes de sécurité des systèmes de fonctionnement critique sont très strictes que le contrôle non destructif (CND) se révèle indispensable.

La plupart des techniques de CND reposent sur l'observation et l'utilisation d'un phénomène physique qui dépend des caractéristiques constitutives ou géométriques du matériau. La présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut) peut perturber cette situation. Les différentes méthodes employées varient en fonction de la nature du contrôle envisagé. Les plus courantes sont les ultrasons, la radiographie, le ressuage et les techniques électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault, flux de fuite magnétique etc...).

Les techniques de flux de fuite ont été utilisées depuis 1868 par l'Institut de l'architecture navale en Angleterre, où les défauts dans des tubes de canon ont été trouvés à l'aide d'une boussole. En 1918, l'inspection par particules magnétiques a été accidentellement découverte. Le développement et la commercialisation de l'inspection par particules magnétiques ont suivi peu de temps après cette découverte. L'un des premiers fournisseurs a été la société MAGNAFLUX, fondée en 1934, et qui reste un des principaux fournisseurs d'équipements d'inspection. [1]

Le contrôle par flux de fuite magnétique (en anglais : Magnetic flux leakage, MFL) est une méthode qui permet de repérer la corrosion et éventuellement les fissures des pièces ferromagnétiques, notamment dans les canalisations et les réservoirs métalliques. Elle fonctionne avec un aimant puissant qui magnétise la paroi de l'appareil (plus généralement le matériau). Une corrosion ou un manque de matière provoque l'échappement du champ magnétique de la paroi.[1]

La méthode de contrôle par flux de fuite magnétique est également utilisée pour détecter les défauts en utilisant un capteur de champ magnétique. Par contre, le courant continu traverse la bobine d'excitation, ce qui permet de magnétiser la pièce ferromagnétique à contrôler. Le principe du contrôle par flux de fuite magnétique consiste à aimanter la pièce à contrôler par un champ magnétique et à détecter à l'aide d'un capteur magnétique les fuites des lignes du champ qui résultent de la présence d'un défaut dans la pièce.[1]



Notre étude est composée de 3 Chapitres :

Le premier chapitre aborde les principes du contrôle non destructif et les différentes techniques disponibles, comme les ultrasons, la radiographie, la magnétoscopie, l'examen visuel, etc... Il présente également les capteurs électromagnétiques, notamment les capteurs inductifs tels que les capteurs à effet Hall, la magnétorésistance et le fluxgate, qui jouent un rôle essentiel dans le contrôle non destructif par flux de fuite magnétique, offrant ainsi des alternatives ou des compléments aux méthodes traditionnelles.

Le deuxième chapitre se concentre sur les fondements théoriques de l'électromagnétisme, y compris les équations de Maxwell, les conditions aux limites et les formulations magnétostatiques possibles. Il introduit des méthodes numériques pour résoudre des équations électromagnétiques complexes, y compris les méthodes ; de différences finies et de volumes finis et la méthode des éléments finis.

Notre travail est basé sur la méthode des éléments finis, largement utilisée dans le chapitre suivant.

Le troisième chapitre concerne la simulation des phénomènes électromagnétiques à l'aide de logiciels spécialisés. Les simulations seront réalisées en 2D, en utilisant FEMM et en 3D, en utilisant COMSOL Multiphysics. Les résultats obtenus sont utilisés pour évaluer l'efficacité des capteurs et la technique utilisée, fournissant des informations précieuses.

# **Chapitre I : Etat de l'art sur le Contrôle Non Destructif**

## I.1 Définition

Le CND comprend différentes méthodes qui permettent d'évaluer l'état des pièces et des structures industrielles sans causer de dommages. Ces techniques sont cruciales pour identifier et comprendre les défauts et des imperfections susceptibles de compromettre la sécurité et la fonctionnalité des systèmes exposés à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Les CND utilisent une gamme de phénomènes physiques et techniques, notamment des méthodes optiques, des tests de ressuage, des détections de fuites magnétiques, des rayonnements ionisants, des vibrations mécaniques, des tests de fuite, des processus électromagnétiques et de nombreuses applications.

Même si les méthodes de CND sont habituellement utilisées dans des contextes industriels tels que la détection des faiblesses dans une chaudière d'une raffinerie de pétrole, elles sont en réalité largement utilisées dans le domaine médical. Par exemple, si une mère enceinte est soumise à une échographie pour évaluer la santé de son bébé, cela pourrait être considéré comme un cas d'utilisation de CND, tout comme une radiographie ou une IRM pour en savoir plus sur une blessure.

Mais il est important de noter que les CND ne nécessitent pas nécessairement l'utilisation d'outils spéciaux ou d'outils quelconques. Par exemple, lorsque les inspecteurs en milieu industriel examinent l'extérieur d'un appareil sous pression à l'œil nu, ce qui relèverait de la désignation CND, puisqu'ils recueillent des données sur l'état d'équipement sans l'endommager. D'autre part, l'utilisation d'un outil sophistiqué comme un capteur à ultrasons pour rechercher des défauts dans un certain matériau ou un actif serait également appelée CND.

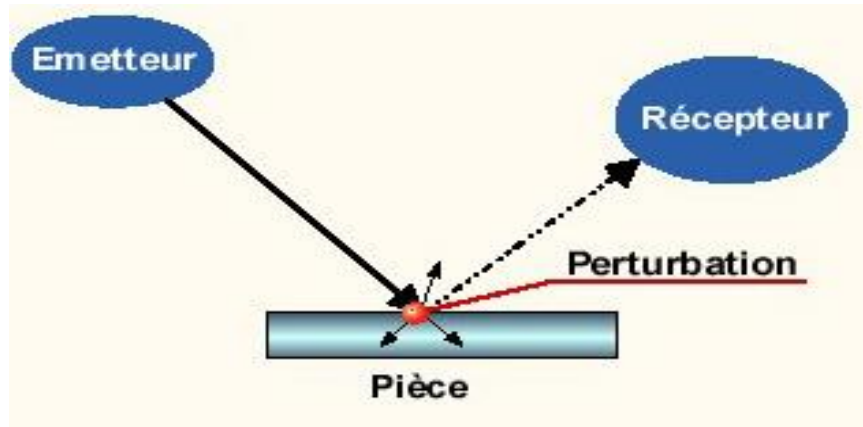
Quel que soit le cas d'utilisation spécifique, le point commun sous-jacent entre tous ces exemples est la collecte de données de manière non destructrice.

## I.2 Principe de la détection d'un défaut dans le CND [2]

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

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (excitation).
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts (perturbation).
- Détection de ces modifications par un capteur approprié (révélation).
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

Un système général de contrôle non destructif est présenté dans la figure (I.1), le principe consiste à éclairer la zone à inspecter avec un signal et à capter à l'aide de capteurs la réponse de l'environnement à ce stimulus. Le signal résultant sera ensuite analysé pour déterminer des paramètres physiques et géométriques afin de vérifier sa composition ou détecter une éventuelle hétérogénéité.



**Figure I.1** Principe du contrôle non destructif

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), énergie électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétiques etc.).

### **I.3 Types et origines des défauts**

#### **I.3.1 Hétérogénéités et défauts**

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa notion négative évoque bien le rôle que joue le CND 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. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes [2].

#### **I.3.2 Défauts de surface**

Les défauts de surface, 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. [2]

##### **I.3.2.1 Défauts ponctuels**

Corresponds aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, 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 l'emploi pour leur détection des méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons etc. [2]

### **I.3.2.2 Défauts d'aspect**

Corresponds à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques. [2]

### **I.3.3 Défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. 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 au sein d'une enceinte ou d'un 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. [2]

## **I.4 Exploration des méthodes de CND**

Le CND comprend diverses méthodes, chacune basée sur un principe physique ou chimique particulier. La dénomination de ses différentes méthodes est incohérente et fait référence à différents aspects tels que l'équipement utilisé, le support de processus impliqué ou la nature physique de l'énergie émise (par exemple acoustique) à tester en combinaison avec sa plage caractéristique de longueurs d'onde (par exemple ultrason).

Les méthodes de contrôle les plus couramment employées peuvent être classées en deux familles principales en fonction du type d'anomalie recherchée dans la pièce. [3]

- Les méthodes de surface (anomalies en surface extérieure) sont les suivantes :
  - Examen visuel (VT).
  - Ressuage (PT).
  - Magnétoscopie (MPT).
  - Courants de Foucault (ECT).
  - Flux de fuite magnétique (MFL).

- Les méthodes volumétriques (anomalies au sein de la pièce) sont les suivantes :
  - Ultrasons (UT).
  - Radiographie (X-ray).

### I.4.1 Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général, puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen préliminaire consiste à examiner visuellement un objet, une structure, un assemblage tel qu'une soudure afin de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : Sélectionner l'angle de tir en radiographie, orienter la magnétisation, sélectionner la fréquence ultrasonore...

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats de types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois, l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique.[2]

L'utilisation d'instruments optiques tels que des loupes (Figure. I.2 (a)), des endoscopes ou des systèmes télévisuels (Figure. I.2 (b)) Si nécessaire, une sensibilité supérieure à celle de l'œil nu peut être obtenue ou un accès à des zones aux géométries complexes ou restrictives.



(a) Miroir d'inspection

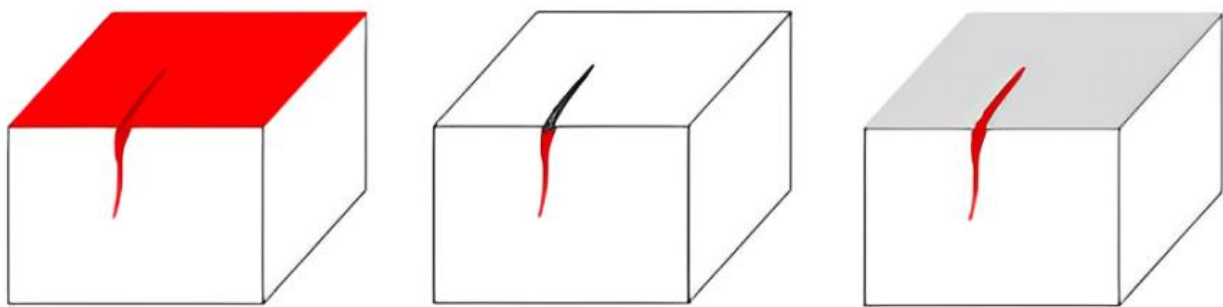


(b) Système Visuel

**Figure I.2** Exemple du CND par l'examen visuel

## I.4.2 Ressuage

Le contrôle par ressuage est souvent utilisé pour détecter les fissures de surface. Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux trois phases illustrées sur la figure (I.3), où cette méthode a généralement recours à des produits optico-chimiques. Elle sert à nettoyer et sécher la pièce à inspecter, puis à appliquer sur sa surface un enduit, qui va pénétrer dans les ouvertures des défauts. Après un certain temps, la surface de la pièce va se lessiver de nouveau, puis est recouverte d'une fine couche de révélateur qui absorbe le pénétrant retenu dans les défauts. Il apparaît des taches colorées en surface et permet de détecter le défaut. [4]



a) Application de l'enduit

b) Pénétration nettoyage

c) Application du révélateur

**Figure I.3** Principe du ressuage

Cette méthode est très simple et efficace pour détecter les fissures superficielles. Il présente des inconvénients en termes d'hygiène et de sécurité ainsi que d'aspects environnementaux dus à la toxicité chimique des substances fluorescentes utilisées. Il est aussi envisageable que les fissures soient recouvertes par des substances difficiles à nettoyer et donc non apparentes. [4]

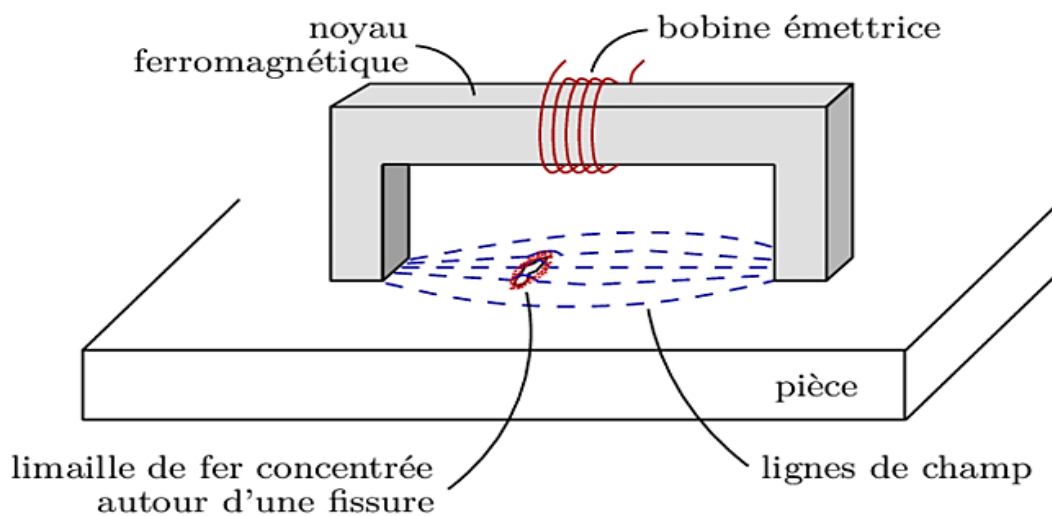
### I.4.2.1 Domaine d'application de ressuage

La méthode est principalement employée pour les produits finis ou en cours d'utilisation lorsque la sollicitation mécanique est élevée. Il s'agit d'une méthode globale pour détecter les défauts de surface dont la propagation peut être catastrophique pendant l'utilisation. C'est dans les domaines de pointe, où la sécurité occupe une place primordiale.

### I.4.3 Magnétoscopie

On utilise cette méthode pour les pièces ferromagnétiques telles que le fer, la fonte etc..., et ne fonctionne que sur les alliages susceptibles d'être magnétisés. Il est utilisé pour détecter les défauts de surface qui apparaissent sur ou sous la surface (très près de la surface de la pièce).

Le test de particules magnétiques consiste à exposer des pièces à un champ magnétique. Les particules magnétiques sont utilisées pour définir la distribution du champ magnétique, comme le montre la Figure (I.4). S'il y a des défauts sur le trajet du champ magnétique, la densité de la surface de la poudre augmente, provoquant des modifications du champ magnétique (généralant un flux de fuite). [4]



**Figure I.4** Principe de la Magnétoscopie

La détection sensible de minuscules défauts de surface sur l'acier, le carbone et d'autres alliages ferromagnétiques est réalisée grâce à l'analyse du flux de fuite magnétique. Ce processus, avec ses capacités polyvalentes de mise en œuvre et d'ajustement, est parfaitement adapté à l'inspection de différents types de composants fabriqués.

Cependant, des défis surviennent lors de l'application de cette méthode pour examiner de grandes pièces ou des géométries complexes. De plus, une démagnétisation et un nettoyage approfondi des pièces sont essentiels après chaque inspection.

### I.4.4 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations élastiques, de fréquence comprise entre 20 KHz et 100 MHz, qui se propagent dans des milieux fluides ou solides. L'onde ultrasonore subit plusieurs phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'interférence. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde, c'est-à-dire la distance parcourue par l'onde pendant une période.

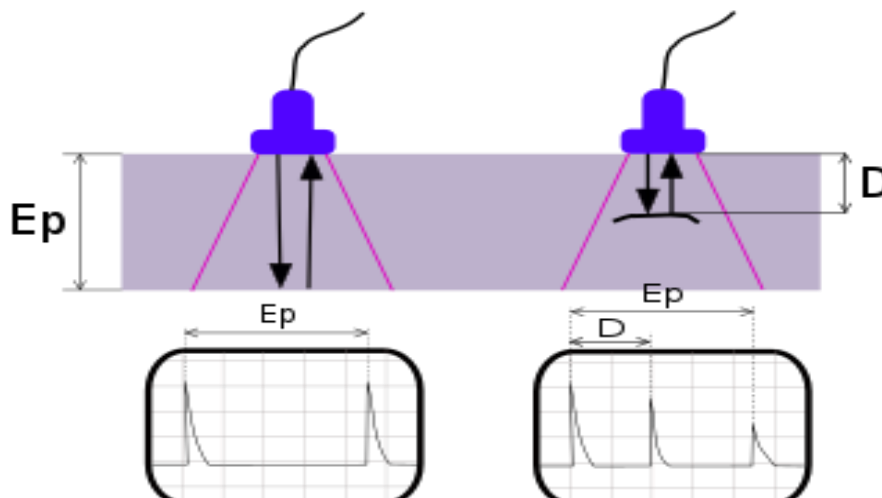


Une onde ultrasonore se propageant dans un milieu déterminé peut aussi être caractérisée d'une part par sa célérité, d'autre part par la perte d'énergie qu'elle subit par unité de longueur de milieu traversé, c'est-à-dire par un coefficient d'absorption. [5]

Une onde ultrasons est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se font en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran comme le montre la figure (I.5).[6]



**Figure I.5** Principe du contrôle par ultrasons

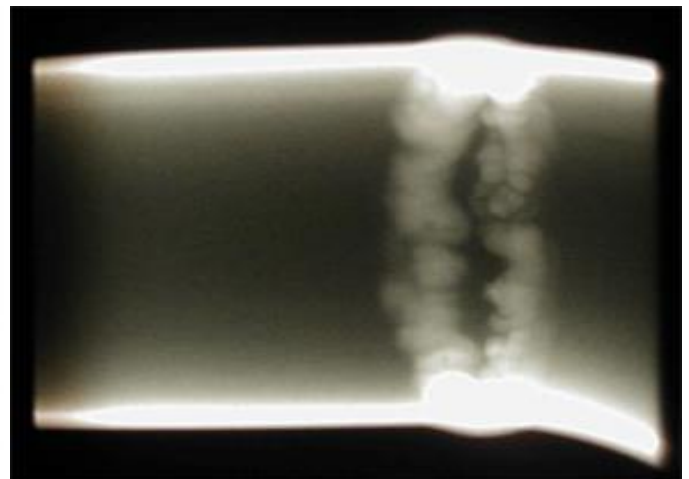
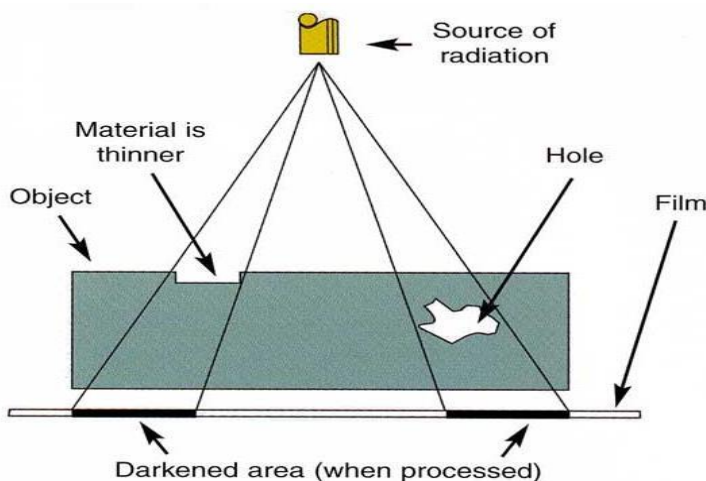
Les avantages de la méthode par ultrasons sont sa grande capacité de pénétration et sa grande sensibilité même aux plus petites fissures. Cependant, les opérateurs doivent être spécialement formés pour tirer parti de la propagation complexe des ondes sonores. Un autre défi cela inclut le test de pièces présentant des géométries complexes, de mauvais états de surface ou de simples petites pièces.

## I.4.5 Radiographie

Par radiographie, on peut étudier la structure ou la santé interne d'un objet en passant un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou rayons gamma) à travers l'objet et en enregistrant la modulation d'intensité du faisceau sur un récepteur approprié (film). Dans la plupart des cas, le support d'enregistrement peut être un film radiographique industriel ou l'un des nombreux types de détecteurs de rayonnement numériques.

Dans les deux cas, Le passage de rayonnement à travers l'objet mesuré expose le milieu, ce qui crée finalement des zones plus sombres où plus de rayonnement traverse la pièce, et des zones plus claires où moins de rayonnement traverse la pièce.

Les radiations ont pénétré. S'il y a des espaces ou des défauts dans la pièce, davantage de rayonnement passera à travers, provoquant un assombrissement de l'image sur le film ou le détecteur, comme le montre la figure (1.6). [3]



(a) Schéma de la radiographie par film

(b) Film radiographiques d'une pièce défectueuse

**Figure I.6** Principe du contrôle par radiographie.

L'intérêt majeur de la radiographie réside dans l'obtention d'une image bien définie de l'uniformité de matière d'une pièce. La détection des indications contrastées est facile et une distinction des différents types d'indications est possible. Elle est applicable à tous les types de matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, composites...). Les limites de la méthode sont liées aux coûts des installations et des consommables ainsi qu'aux dangers des rayonnements ionisants imposant une réglementation et des consignes strictes. [3]

## I.4.6 Courants de Foucault

Le procédé consiste à produire un courant induit dans un matériau conducteur en variant le flux magnétique. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et ont un profil et une répartition qui dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie de la pièce inspectée et des propriétés de conductivité électrique et magnétique.

Lorsque des anomalies surviennent au sein de la chambre (région d'un matériau) de contrôle, leur mouvement est perturbé comme le montre la figure (1.7), provoquant une modification de l'impédance apparente du capteur, en fonction de la nature de l'anomalie et de ses dimensions volumétriques. L'analyse des changements d'impédance fournit des indications utiles pour réaliser des inspections. [7]

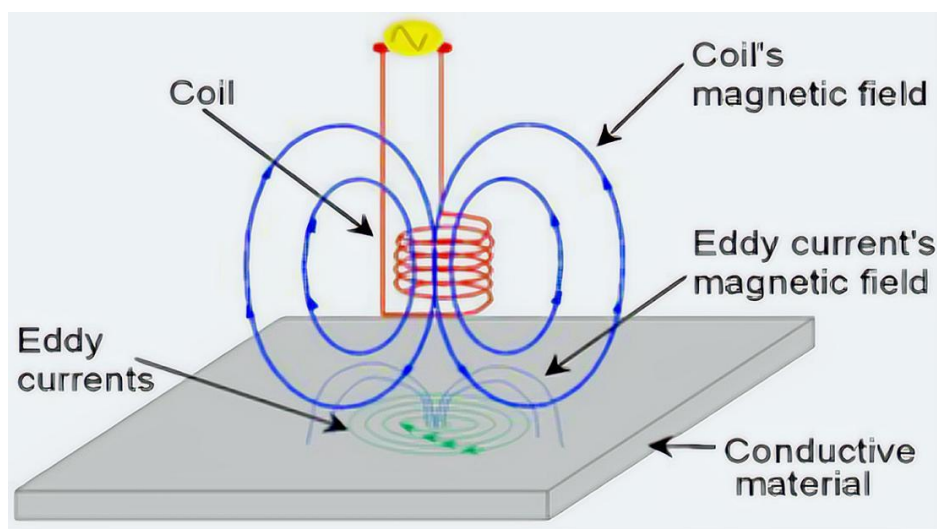


Figure I.7 Principe du contrôle par CF

L'interprétation des signaux collectés s'effectue en comparant les signaux enregistrés dans le matériau examiné avec des signaux standard, incluant des anomalies qui représentent les phénomènes recherchés. Cette inspection consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique jusqu'à saturation. En cas d'obstacle sur le chemin, le champ sera déplacé. Lorsque l'obstacle est près de la surface, il est possible que les lignes de champ magnétique s'échappent de la pièce.

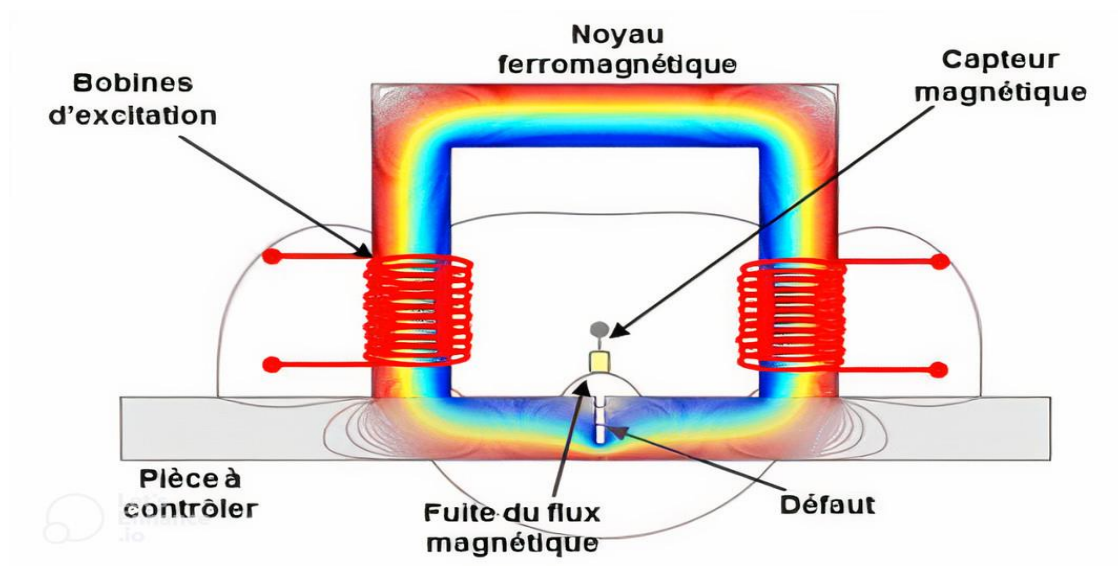
## I.4.7 Flux de fuite magnétique (Magnetic flux leakage)

### I.4.7.1 Principe de MFL

Les dispositifs MFL sont généralement constitués d'un circuit magnétique magnétisé par un ensemble de bobines d'excitation alimentées par un courant continu. Le circuit magnétique forme avec la pièce à étudier un circuit magnétique fermé. La présence d'un capteur lors du balayage de la pièce permet de relever les champs qui fuient dans l'air.

Au voisinage d'un défaut, le parcours des lignes de champ est modifié. Les lignes du champ magnétiques contournent les zones d'air et quelques lignes du champ viennent à fuir dans l'air à proximité du défaut. Ces variations locales du champ magnétique sont détectées par un capteur du champ magnétique.[8]

Pour optimiser le système de contrôle, il est essentiel de mener de nombreuses études paramétriques sur le système de contrôle. C'est pourquoi il est essentiel d'avoir un outil de simulation assez rapide pour faire face à un grand nombre de calculs. Nous pouvons facilement repérer les fluctuations locales du champ magnétique lorsque le défaut se manifeste à la surface de la pièce à contrôler, comme le montre la Figure (I.8).

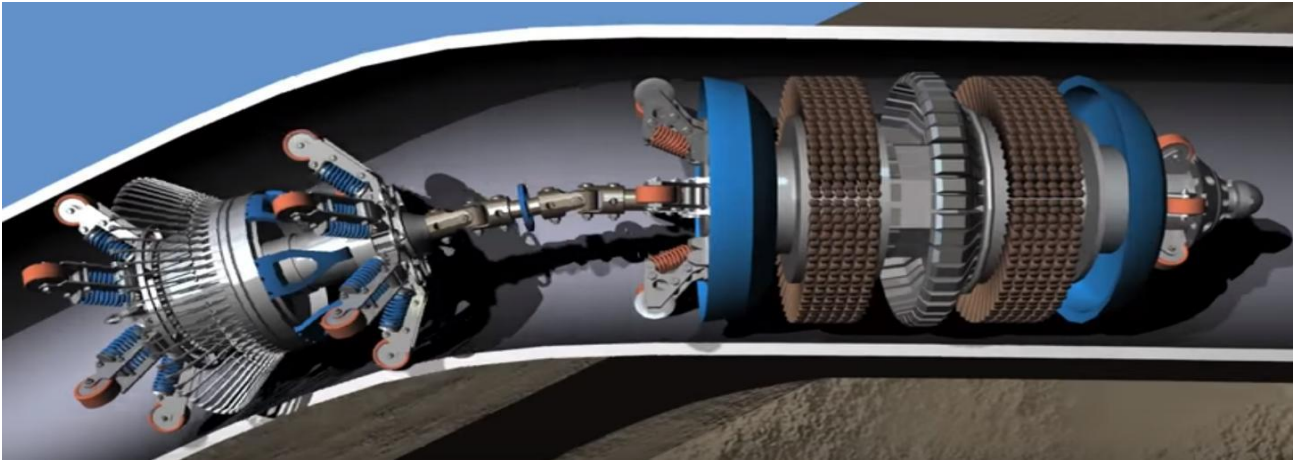


**Figure I.8** Principe du contrôle par flux de fuite magnétique

La technologie MFL sera utilisée dans notre étude, parmi les technologies CND mentionnées précédemment. Deux photos du dispositif CND à fuite de flux sont présentées par les figures (I.9) et (I.10).



**Figure I.9** Photo de l'appareil du CND par flux de fuite magnétique (inspection des plaques)



**Figure I.10** Photo de l'appareil du CND par flux de fuite magnétique (inspection des pipelines)

#### **I.4.7.2 Avantages et inconvénients du CND par flux de fuite magnétique**

Les avantages de la technique de flux de fuite magnétique :

- Utilisation afin de surveiller des plaques ou des tuyaux.
- Peut être employé lors de la construction ou pendant son utilisation.
- Évaluation de vastes espaces pendant une période limitée.
- Indique la taille (longueur et profondeur) des imperfections.
- Technologie maîtrisée avec soin.

Les inconvénients de la technique de flux de fuite magnétique :

- Le prix élevé de l'équipement.
- Soigneusement nettoyer et sabler les équipements avant de les vérifier.
- Analyse complexe des données obtenues lors de l'inspection des tôles trop volumineuses.

### **I.5 Domaines d'application du CND**

- Aéronautique et Aérospatial (Inspection des pièces et des structures des avions et des engins spatiaux pour détecter des fissures, des défauts de fabrication et de corrosion).
- Automobile (Vérification de la qualité des soudures et des composants en métal et en plastique).
- Génie Civil et Construction (Inspection des infrastructures telles que les ponts, les bâtiments, les barrages, et les pipelines pour détecter des fissures, des vides et des défauts structurels).

- Énergie (Nucléaire, Pétrole et Gaz).
- Marine (Inspection des coques de navires, des structures sous-marines et des pipelines offshore pour détecter la corrosion et les défauts structurels).
- Ferroviaire (Inspection des rails, des roues et des structures des trains pour détecter des fissures et des défauts, assurant la sécurité et la fiabilité des systèmes ferroviaires).
- Médical (Utilisation d'imageries non destructives comme les ultrasons et les rayons X pour diagnostiquer les conditions médicales sans interventions invasives).

## **I.6 Capteurs magnétiques utilisés au CND**

Le composant initial de la chaîne de mesure d'un capteur est constitué d'un dispositif qui convertit un paramètre physique en signal électrique. Les capteurs magnétiques emploient divers principes, chacun ayant ses propres applications distinctes. Ces applications varient non seulement en matière de coût, mais également en matière de plage de mesure et de résolution.

### **I.6.1 Capteurs inductifs**

Les capteurs inductifs utilisés pour les têtes de lecture de magnétophone ou de magnétoscope utilisent l'effet inductif. Un bobinage est réalisé autour d'un circuit magnétique qui a pour rôle de canaliser le champ magnétique. Cet effet est utilisé aussi pour des capteurs de position, pour des capteurs de pression ou pour des détecteurs de défaut dans les structures mécaniques.

Ce principe utilise les Courants de Foucault générés dans le matériau. Le parcours de ces courants est modifié en présence de défauts mécaniques [9]. Un capteur inductif transforme un champ magnétique qui le traverse en tension grâce au phénomène d'induction par la loi de Lenz-Faraday. Cette loi montre que la force électromotrice créée est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'induction : la composante continue du champ magnétique est rejetée. Pour la même raison, la sensibilité en hautes fréquences est relativement grande [10]. Nous désignons 3 types de capteurs inductifs :

#### **I.6.1.1 Capteurs à effet hall**

Les capteurs à effet Hall sont des capteurs qui permettent de mesurer la présence d'un champ magnétique. Pour cela, comme leur nom l'indique, ils utilisent l'effet Hall. Pour expliquer grossièrement, l'effet Hall permet de générer une tension proportionnelle au champ magnétique qui traverse le matériau. [11]

Les capteurs à effet Hall reposent sur les effets de la force de Lorentz sur les porteurs de charges quasi libres dans la matière condensée, plus particulièrement dans les semi-conducteurs. En présence d'un champ électrique  $\mathbf{e}$  et d'un champ magnétique  $\mathbf{b}$ , il s'exerce une force sur une particule se déplaçant à la vitesse  $\mathbf{v}$ . [12]

$$\mathbf{F} = q \mathbf{e} + q (\mathbf{v} \times \mathbf{b}) \quad (\text{I. 1})$$

Où  $q$  est la charge de la particule (+ $e$  pour un trou et  $-e$  pour un électron).

Le premier terme de cette force est souvent appelé force électrostatique et le deuxième terme force de Lorentz. On trouve parfois les dénominations termes électrique et magnétique de la force de Lorentz. La figure (I.11) montre le principe des capteurs à effet Hall.

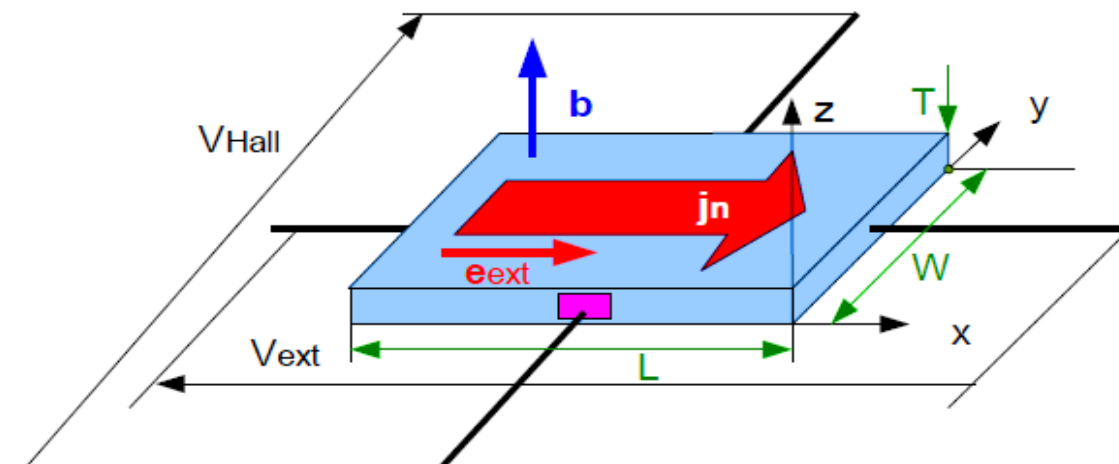
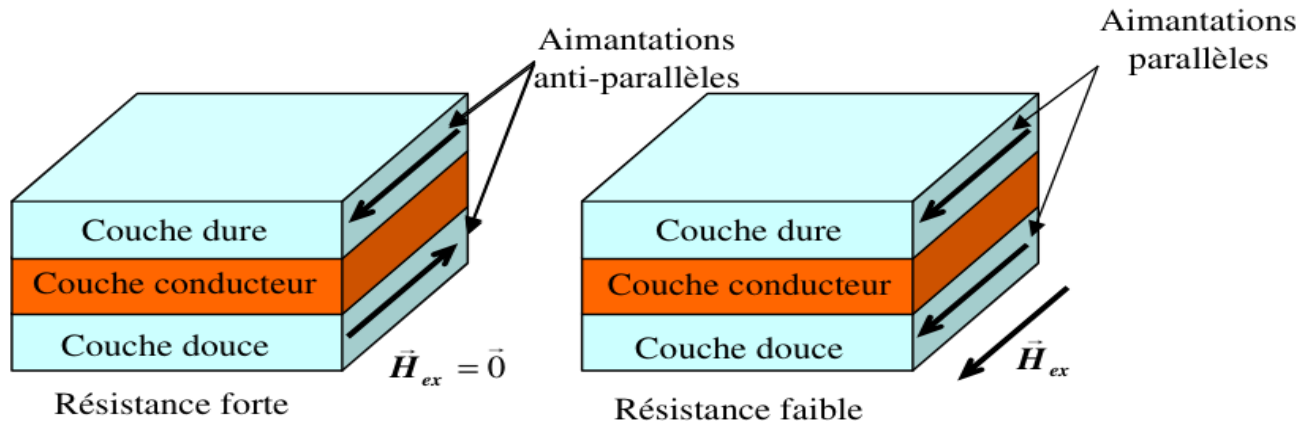


Figure I.11 Principe des capteurs à effet Hall

### I.6.1.2 Les magnétorésistances [13]

Il existe différents types de capteurs MR : GMR, AMR (anisotropique MR), TMR et CMR (colossal MR). Ce paragraphe n'a pas pour objectif de détailler le fonctionnement de tous ces capteurs. À titre d'exemple, une GMR est composée de deux couches ferromagnétiques séparées par une couche 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 deux couches minces (couches « dure » et « douce ») 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, par conséquent, la résistance de la jonction devient très faible. Comme le montre la figure (I.12).



**Figure I.12** Évolution de l'aimantation des couches d'une GMR en fonction du champ magnétique appliqué

### I.6.1.3 Capteur fluxgate

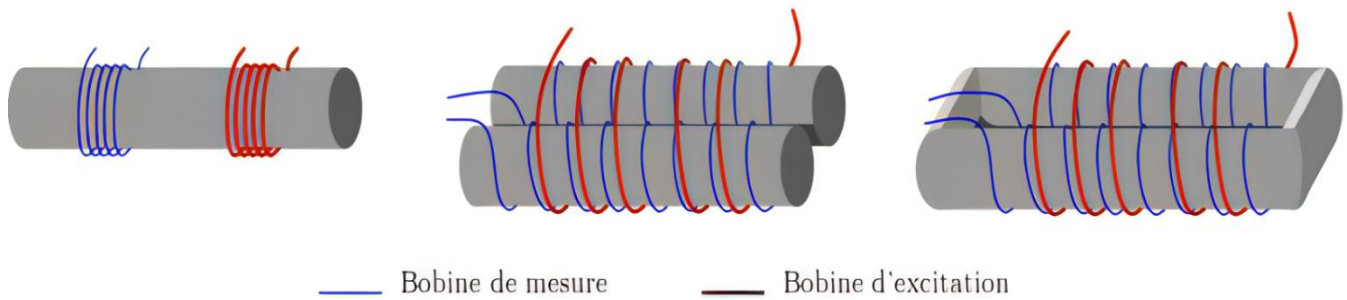
Un dernier type de capteur de champ magnétique, d'une technique assez récente, est représenté par le capteur fluxgate. Il s'agit de capteurs formés autour d'un noyau magnétique, pouvant avoir des formes relativement diverses. La figure (1.13) montre trois exemples de géométries possibles. Le matériau du noyau doit avoir une courbe d'aimantation  $B = f(H)$  comportant une forte saturation de l'induction lorsque le champ magnétique est élevé. Le permalloy est par exemple un matériau très utilisé dans ce type d'application.

Un enroulement excitateur entourant au plus proche le noyau est parcouru par un courant alternatif non nécessairement sinusoïdal, créant un champ magnétique alternatif dans le noyau, localement parallèle à l'axe de l'enroulement. L'induction correspondante subit une saturation symétrique par rapport à zéro. Un autre enroulement est disposé autour du noyau, son axe étant rectiligne. Il n'est pas alimenté, et la force électromotrice créée à ses bornes est, selon la loi de Lenz, proportionnelle à la dérivée du flux de l'induction magnétique dans la ou les parties du noyau entourées.

Lorsqu'un champ magnétique extérieur s'ajoute au champ d'excitation à l'endroit où est bobiné l'enroulement de réception, la saturation de l'aimantation n'est plus symétrique et la tension est déformée. Cette déformation est en général visible dans l'amplitude des harmoniques paires de la tension. Selon la fonction d'onde de l'excitation, il peut aussi s'agir des harmoniques impaires.

Le capteur fluxgate a une grande sensibilité, en particulier pour les champs magnétiques continus. Ils sont ainsi très employés dans les boussoles, car ils sont capables de détecter le champ magnétique terrestre. Dans les applications CND, leur mise en œuvre demande une miniaturisation importante, ce qui leur confère une réputation de technologie relativement coûteuse. [14]





**Figure I.13** Exemples des géométries de fluxgate.

## I.7 Conclusion

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques, ou la détection des défauts apparaissant dans des structures Industrielles diverses.

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différentes techniques du CND ainsi que leurs avantages et inconvénients. De plus, nous avons donné un aperçu sur les différents types de capteurs magnétiques employés dans ce domaine. Parmi les différentes méthodes du CND, celle du flux de fuite magnétique est très employée pour le contrôle des plaques d'acier et des pipelines. Notre choix s'est rapidement porté sur cette technique.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation des différents outils mathématiques nécessaires pour la modélisation d'un dispositif électromagnétique. Des applications d'un capteur à flux de fuite magnétique vont être effectuées.

**Chapitre II : Modélisation**  
**Électromagnétique et Formulations Eléments**  
**Finis**

## II.1 Introduction

La technique de fuite de flux magnétique (MFL) est fréquemment utilisée pour les tests non destructifs des plaques ferromagnétiques. Cette méthode consiste à saturer la pièce à examiner par magnétisation. Le circuit d'excitation magnétique dirige les lignes de champ, le composant testé complétant le circuit magnétique. Lorsqu'un défaut est présent, des fuites de flux magnétiques se produisent, qui peuvent être détectées par un capteur de champ magnétique. Pour améliorer la qualité du processus de test, il est nécessaire de disposer d'un outil de simulation précis et efficace permettant des études paramétriques permettant un meilleur contrôle et une optimisation du processus d'inspection.

Dans ce chapitre, nous décrivons d'une manière détaillée les phénomènes physiques liés à l'électromagnétisme. Tout d'abord, une brève présentation des équations de Maxwell, des lois de comportement des milieux et des conditions du champ appliquées à la frontière du domaine de résolution est donnée. On traitera par la suite les principales méthodes numériques avec un accent particulier sur la méthode des éléments finis (MEF).

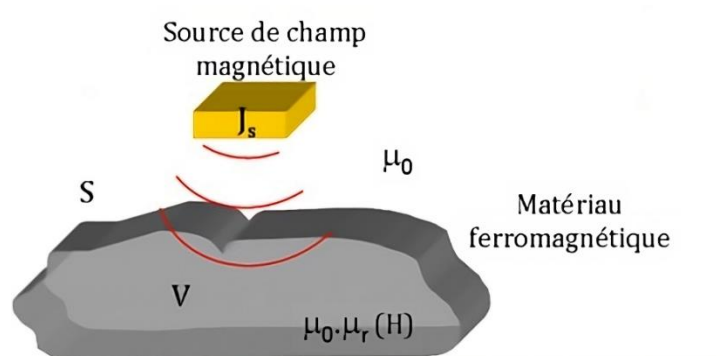
## II.2 Phénomène physique

Pour illustrer le problème physique, on considère le cas général d'un corps ferromagnétique de perméabilité magnétique  $\mu(r)$  occupant un volume dans l'espace libre avec  $r$  un point de cet espace de coordonnées  $(x, y)$ . Le volume est contenu à l'intérieur d'une surface fermée  $S$ . On considère une source de courant  $J_s$  qui crée un champ magnétique d'excitation  $H_s(r)$ . Le champ engendre la magnétisation du milieu ferromagnétique et le vecteur d'aimantation  $M$  définit l'état de la magnétisation. [1]

On définit  $B(r)$  comme étant l'induction magnétique et  $H(r)$  comme étant l'intensité du champ magnétique telle que :

$$B(r) = \mu(r)H(r) \quad (\text{II. 1})$$

Où  $\mu(r)$  est la perméabilité magnétique du matériau dépendant non linéairement de l'intensité du champ magnétique  $H(r)$ . La courbe B-H illustrant la relation non-linéaire est supposée connue.



**Figure II.1** Exemple illustratif du phénomène physique

## II.3 Lois d'électromagnétisme

L'électromagnétisme est un domaine majeur de la physique qui étudie les champs électriques et magnétiques et leurs interactions. Il est décrit par les équations de Maxwell, un ensemble de quatre équations qui établissent la relation entre le champ électrique, le champ magnétique, relations des milieux et les conditions de passage.

### II.3.1 Équations de maxwell

Les lois de comportement des milieux et les quatre équations de Maxwell régissent tous les phénomènes électromagnétiques. Afin de déterminer le champ électromagnétique d'un dispositif électrotechnique, les quatre équations sont employées.

Les principales équations aux dérivées partielles de Maxwell sont écrites de manière la plus générale comme suit :

- Equation de Maxwell-Ampère:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

- Équation de Maxwell- Faraday :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 3})$$

- Équation de conservation de l'induction magnétique :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 4})$$

- Equation de Maxwell-Gauss:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 5})$$

Le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  représente le courant de déplacement. Il est généralement négligeable dans les cas quasi statiques des dispositifs de l'électrotechnique.

$\vec{E}$ : Champ électrique [V/m].

$\vec{B}$ : Induction magnétique [T].

$\vec{H}$ : Champ magnétique [A/m].

$\vec{D}$ : Induction électrique [V/m].

$\rho$ : Densité de charge volumique [C/m<sup>3</sup>].

$\vec{J}$ : Densité de courant surfacique [A/m<sup>2</sup>], elle est donnée par :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (\text{II. 6})$$

$\vec{j}_d$ : Densité du courant de déplacement.

$\vec{j}_c$  : Densité du courant de conduction électrique.

En utilisant l'équation de Maxwell-Ampère, nous sommes en mesure d'établir une corrélation claire entre le champ électrique, le champ magnétique et les courants électriques. D'un autre côté, l'équation de Maxwell-Faraday sert de représentation de la loi de l'induction, reliant effectivement le champ électrique à l'induction magnétique. Cette formulation mathématique capture avec précision le phénomène d'induction se produisant dans un conducteur exposé à un champ magnétique variable ou en mouvement dans un champ magnétique constant. Le lien entre les champs et leurs sources est établi par les deux premières équations. En revanche, les troisième et quatrième équation introduisent respectivement le concept de conservation du champ magnétique et de préservation de la charge électrique.

### II.3.2 Relations des milieux

Des relations supplémentaires caractérisant les différents milieux doivent être ajoutées aux équations précédentes. Pour les milieux isotropes, nous avons les formulations suivantes :

- Caractéristique magnétique :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II. 7})$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m : perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  : perméabilité magnétique relative du milieu. Pour un milieu amagnétique  $\mu_r=1$ . Pour un milieu magnétique  $\mu_r=\mu_r(H)$ .

$B_r$  : Induction magnétique rémanente.

- Caractéristique diélectrique:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (\text{II. 8})$$

$\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  [F/m] : permittivité électrique du vide.

$\epsilon_r$ : permittivité relative du milieu considéré.

- Loi d'Ohm:

Pour un milieu conducteur, la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II. 9})$$

$\sigma$  [( $\Omega \cdot m$ )-1]: Conductivité électrique.

### II.3.3 Conditions de passage entre deux milieux différents

Les champs électromagnétiques subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés physiques différentes, pour cette raison des conditions de transmission entre deux milieux différents sont définies comme suit : [15]

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

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II. 10})$$

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

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II. 11})$$

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

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = J_s \quad (\text{II.12})$$

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

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{II. 13})$$

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

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

$\rho_s$  : La densité surfacique de charge libre à l'interface.

### II.3.4 Conditions aux limites

D'une manière générale pour une variable  $u$ , les conditions aux limites s'énoncent pour un domaine de calcul  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  comme suit :

- ✓ Condition de Dirichlet homogène  $u \cdot \vec{n} = 0$

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de l'inconnue sur la frontière du domaine de résolution.[16]

- ✓ Condition de Neumann homogène  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine d'étude.[16]

$n$  : est un vecteur normal à  $\Gamma$ .

## II.4 Formulation du champ électromagnétique

Pour résoudre les équations de Maxwell, on utilise directement des variables d'état de type champs électriques et magnétiques. Des variables potentielles peuvent également être ajoutées. Dans le domaine des problèmes électromagnétiques tridimensionnels, magnétostatiques ou magnétodynamiques, diverses approches ont été suggérées en ce qui concerne les potentiels magnétiques et électriques, qu'ils soient scalaires ou vecteurs. Le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  être la formulation la plus appropriée pour les problèmes magnétostatiques.[11]

### II.4.1 Formulation magnétostatique et hypothèses simplificatrices

En fonction de la nature des dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes sont négligeables. Par conséquent, les équations sont simplifiées afin de produire des modèles plus simples. En ce qui concerne les dispositifs que nous devons examiner, ils seront caractérisés par :

- Les fréquences mises en œuvre dans le CND ne dépassent pas l'ordre de 1 MHz. Ce qui nous permet de négliger les courant de déplacements  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$  (quasi stationnaire).
- Une densité surfacique de courant nulle ( $J_s = 0$ ).
- Une densité volumique de charge nulle ( $\rho_s = 0$ ). [3]

Les phénomènes magnétostatiques sont régis par les équations de Maxwell qui se réécrivent comme suit :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II. 14})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 15})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{div } \vec{D} = 0 \quad (\text{II. 17})$$

Le champ magnétique crée par les aimants permanent est indépendant du temps, donc on peut simplifier l'équation (II.15) :

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \quad (\text{II. 18})$$

De plus, le matériau se distingue par une courbe (BH) non linéaire et est représenté par la relation (II.7), où  $B_r$  est la rémanente des aimants. Le système d'équation suivant sera utilisé :

$$(\text{II. 19}) \quad \left\{ \begin{array}{lll} \text{rot } \vec{E} = 0 & \text{div } \vec{B} = 0 & \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \\ \text{rot } \vec{H} = 0 & \text{div } \vec{D} = 0 & \vec{j} = \sigma \vec{E} \end{array} \right.$$

### II.4.1.1 Formulation en potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$

Nous pouvons utiliser l'équation (II.16) pour introduire le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$ , ce qui permet de diminuer le nombre d'inconnus dans nos équations, ce qui facilite leur résolution. [11]

Ainsi, étant donné que la divergence de l'induction magnétique est nulle et que la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut identifier l'induction avec le rotationnel d'une grandeur vectorielle  $\vec{A}$  en tout point de l'espace, comme le montre l'équation suivante : [11]

$$\text{div}(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = 0 \quad (\text{II. 20})$$

Donc on peut définir le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II. 21})$$

En remplaçant l'induction B par son expression. A partir de l'équations (II.21) dans (II.7), on obtient :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{B} - \vec{B}_r) \quad (\text{II. 22})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \frac{(\vec{B} - \vec{B}_r)}{\mu} = 0 \quad (\text{II. 23})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{\vec{B}}{\mu} \right) - \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) = 0 \quad (\text{II. 24})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \overrightarrow{\text{rot}} \frac{\vec{A}}{\mu} \right) = \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) \quad (\text{II. 25})$$

Après simplifications, nous aboutissons à la formulation magnétostatique donnée par l'équation (II.26). On désigne cette équation sous le nom d'équation de diffusion électromagnétique de grandeur. Nous allons résoudre cette équation dans notre problème.

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \nu \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B}_r \quad (\text{II. 26})$$

Où  $\nu$  est la réductivité magnétique ( $\nu = \frac{1}{\mu}$ ). [20]

Pour assurer l'unicité de la solution, la contrainte supplémentaire de la jauge de Coulomb est naturellement vérifiée en 2D :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 27})$$



## **II.5 Méthodes de résolution**

La modélisation des dispositifs électromagnétiques repose largement sur la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP), car la résolution de ces formulations est cruciale dans ce contexte.

Lorsqu'il s'agit d'aborder un système d'équations aux dérivées partielles, il existe différentes approches. Il s'agit notamment de méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques. Le choix d'une technique particulière dépend des caractéristiques et de la géométrie du problème. [11]

### **II.5.1 Méthodes numériques**

Lorsqu'il s'agit de résoudre les équations de Maxwell, qui peuvent souvent s'avérer difficiles, voire impossibles, des méthodes numériques sont nécessaires. Ces méthodes nous permettent de nous rapprocher de la solution exacte du problème posé. Dans les paragraphes suivants, nous aborderons les techniques numériques les plus couramment utilisées. [11]

#### **II.5.1.1 Méthode des différences finies**

La technique des différences finies utilise une expansion en série de Taylor pour approximer l'opérateur différentiel par un opérateur de différence. Malgré la possibilité de proposer des solutions acceptables dans de nombreux cas, cette méthode reste restrictive lorsqu'il s'agit de configurations géométriques complexes. [20]

#### **II.5.1.2 Méthode des volumes finis**

Le domaine d'étude dans la méthode des volumes finis est divisé en volumes élémentaires de manière à ce que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies). Chacun des volumes élémentaires contient l'équation. Pour obtenir l'intégrale dans ce volume élémentaire, on utilise une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds successifs pour représenter la fonction inconnue. Par la suite, la forme complète est exclue du champ d'étude. Cela aboutit à une solution plus précise que celle utilisant la méthode des différences finies (MDF). [22]

## **II.6 Méthode des éléments finis (MEF)**

La modélisation des phénomènes électromagnétiques repose sur le calcul de distributions de champs, dont la réalisation se fait soit par des calculs analytiques, ce qui rend la modélisation très difficile, soit par des méthodes numériques efficaces basées sur la discrétisation et l'approximation, convertissant les équations aux dérivées partielles (EDP) en un système d'équations algébriques permettant de comprendre les variables aux nœuds du maillage.

### II.6.1 Principe de la MEF

La MEF consiste à découper le domaine spatial en petits éléments finis appelés mailles et rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément par un système d'équations linéaires qui peut être représenté par une matrice. En rassemblant tous les systèmes d'équations obtenues pour les différents éléments finis, on obtient une grande matrice, la résolution de ce système global nous donne la solution approchée au problème. [19]

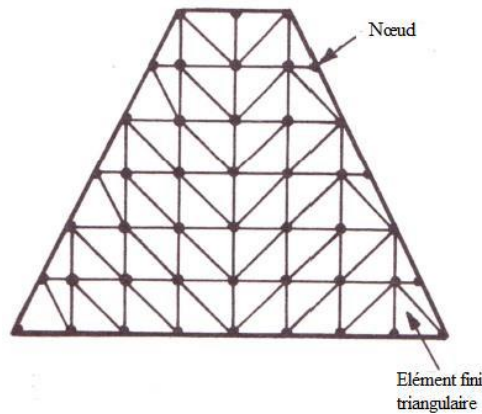
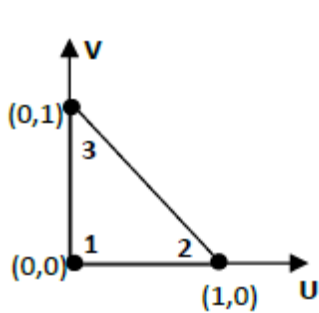


Figure II.2 Exemples de maillages

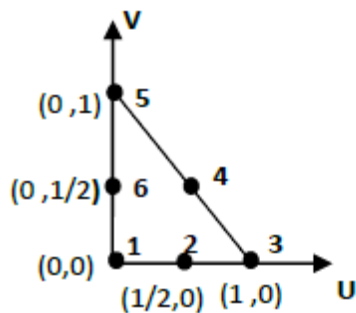
En cas de problèmes à deux ou trois dimensions, les éléments fondamentaux, également connus sous le nom d'éléments de référence, comprennent :

- **Éléments à deux dimensions:**

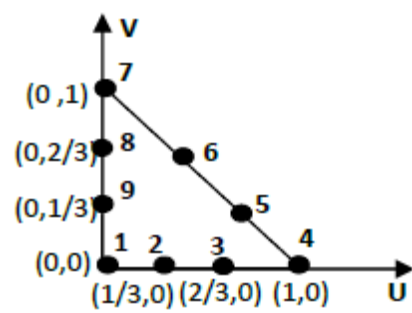
- 1) *Élément triangulaire:*



Linéaire (3 nœuds)

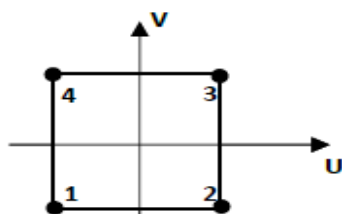


Quadratique (6 nœuds)

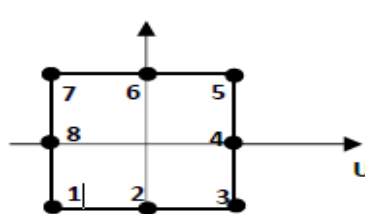


Cubique (9 nœuds)

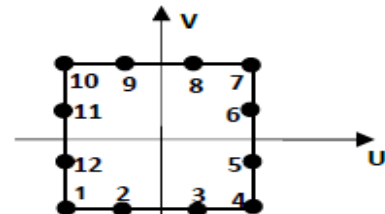
- 2) *Élément carré :*



Linéaire (4 nœuds)

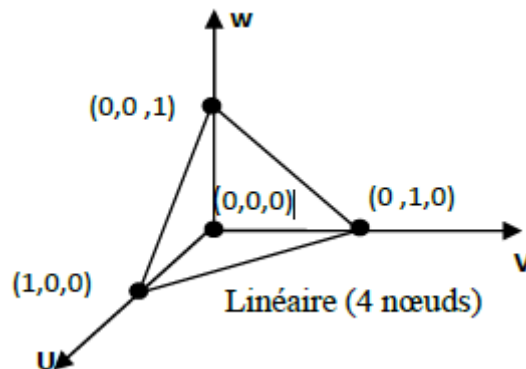


Quadratique (8 nœuds)



Cubique (12 nœuds)

- **Éléments à trois dimensions:**



## II.6.2 Étapes de résolution par la MEF

La modélisation par éléments finis est effectuée suivant plusieurs étapes :

- ▶ **Discrétisation du domaine :** Cette étape consiste à découper le domaine d'étude en éléments finis en utilisant un maillage. Cette représentation est constituée d'éléments, d'arêtes et de nœuds interconnectés.
- ▶ **Choix de la fonction d'interpolation :** Les fonctions d'interpolations sont utilisées pour interpoler les variables du champ sur l'élément. On utilise fréquemment les polynômes comme fonctions d'interpolation. Ils varient en fonction du nombre de nœuds présents dans l'élément.
- ▶ **Propriétés de l'élément :** En ce qui concerne les caractéristiques de l'élément, il est nécessaire de créer le système d'équations algébriques qui relie les valeurs nodales de la fonction inconnue à d'autres paramètres. Afin d'accomplir cela, il est possible d'utiliser diverses méthodes ; les plus couramment utilisées sont l'approche variationnelle et la méthode de Galerkin.
- ▶ **Assemblage des équations de l'élément :** Avant de résoudre l'équation de l'élément, il est nécessaire d'imposer les conditions aux limites. L'objectif de cette étape est de déterminer le système d'équations globales pour la solution, ce qui implique l'assemblage de toutes les équations des éléments.
- ▶ **Résoudre le système d'équations globales :** Pour résoudre le système d'équations globales, il est possible d'utiliser des méthodes directes et itératives. [11]

Les différentes étapes de la mise en œuvre de la MEF sont résumées par la figure suivante :

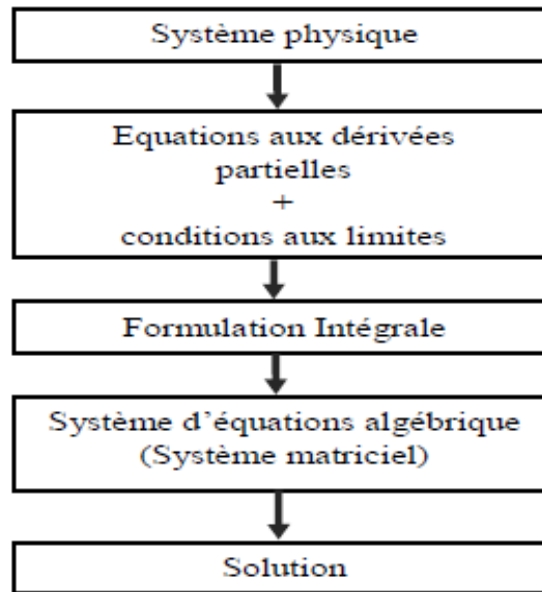


Figure II.3 Les étapes de résolution par MEF

### II.6.3 Forme de la matrice élémentaire

L'objectif est de présenter les formes intégrales de l'équation à résoudre sous forme matricielle. Chaque domaine élémentaire est représenté par une équation de la forme suivante :

$$[K]^e \cdot [A]^e = [F]^e \quad (\text{II. 28})$$

Avec  $[K]^e$ , il s'agit de la matrice liée à l'élément en question. Les coefficients varient en fonction de la position des nœuds de l'élément. Les inconnues aux nœuds du même élément sont les composantes de  $[A]^e$ . Le vecteur source élémentaire  $[F]^e$  tient compte des potentiels limites en certains points de l'élément en question. Une série d'équations algébriques est obtenue en écrivant l'équation (II.28) pour tous les éléments.

### II.6.4 Résolution du système algébrique

La construction de la matrice globale  $[K]$  et du vecteur global  $[F]$  à partir des matrices élémentaires  $[K]^e$  et des vecteurs élémentaires  $[F]^e$  est appelée l'assemblage. De cette manière, on obtient un système de forme : [11]

$$\sum_{e=1}^{ne} [K]^e \cdot [A]^e = \sum_{e=1}^{ne} [F]^e \quad (\text{II. 29})$$

Le nombre d'éléments dans le domaine d'étude étant limité.

Donc, on obtient un ensemble d'équations algébriques de la forme suivante :

$$[K]. [A] = [F] \quad (\text{II. 30})$$

La matrice de rigidité magnétique globale [K] est calculée en sommant les matrices élémentaires étendues, tandis que le vecteur source global [F] est le vecteur source.

La MEF présente un avantage par rapport aux autres méthodes en permettant de traiter des configurations complexes. Nous utiliserons précisément cette méthode dans notre étude (modélisation d'un système capteur cible).

### II.6.5 Fonctions d'interpolation et expression d'approximation

La fonction d'approximation consiste à chercher la meilleure approximation d'une fonction  $N(x)$  dans le domaine  $\Omega$  de manière à satisfaire au mieux les lois physiques auxquelles elle obéit, le terme A représenté la valeur de l'inconnue que nous devons résoudre (comme le déplacement, la température, le potentiel, etc.)

$$A^e(x, y) = \sum_{k=1}^n N_k(x, y). A_k \quad (\text{II. 31})$$

$A^e(x, y)$  : est la Valeur approchée de A à l'intérieure de l'élément.

$n$  : est le nombre de nœuds de l'élément.

$N_k(x, y)$  est la fonction de forme associée au nœud k.

$A_k(x, y)$ : est la valeur de l'inconnue A dans le nœud K.

### II.6.6 Forme discrète de la formulation en potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$

Soit  $n_{eq}$  le nombre de degrés de liberté de la discrétisation et  $\vec{w}_i$  ; avec  $i = 1, \dots, n_{eq}$  les fonctions test appartenant à l'espace  $p^k$  pour les éléments nodaux et  $H(rot)$  pour les éléments mixtes et vérifiant la condition (II.32): [21]

$$\vec{n} \times \vec{w}_i = \vec{0}, \text{ sur la frontière } \Gamma_B \text{ où } \vec{n} \cdot \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{II. 32})$$

L'application de la méthode de Galerkin à l'équation (II.26), qui constitue la formulation en potentiel vecteur magnétique, permet d'écrire :

$$\int_{\Omega} \vec{w}_i \text{rot}(v \text{rot}\vec{A}) d\Omega = \int_{\Omega} \vec{w}_i (v \text{rot}\vec{A}) d\Omega \text{ avec } i = 1, \dots, n_{eq} \quad (\text{II. 33})$$

Après l'application du théorème de Green, la forme discrète de la formulation devient :

$$\int_{\Omega} (\text{rot } \vec{w}_i \cdot v \text{ rot } \vec{A}) d\Omega - \int_{\Gamma} \vec{w}_i \cdot (\vec{n} \times v \text{ rot } \vec{A}) d\Gamma = \int_{\Omega} \vec{w}_i \cdot v \text{ rot } \vec{B} r d\Omega \quad (\text{II.34})$$

La forme matricielle de la formulation se déduit très aisément de l'équation (II.34), en exprimant A comme une combinaison linéaire des fonctions de base et des degrés de liberté associés. Le système à résoudre s'écrit [21] :

$$\sum_{j=1}^{neq} \left[ \int_{\Omega} (\text{rot } \vec{w}_i \cdot v \text{ rot } \vec{w}_j) d\Omega \right] A_j = \int_{\Omega} \vec{w}_i \cdot (v \text{ rot } \vec{B} r) d\Omega \quad (\text{II.35})$$

## II.7 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de présenter les équations de l'électromagnétisme et d'expliquer comment elles peuvent être exprimées à l'aide du potentiel vecteur magnétique, tout en discutant des conditions aux limites et de la méthode de résolution de ces équations. L'un des principaux avantages de l'utilisation de la méthode des éléments finis est sa capacité à analyser des géométries complexes. Dans le domaine de la modélisation et de la simulation des techniques de flux de fuite magnétique, cette capacité permet d'avoir des réponses satisfaites sur des composants complexes et d'utiliser des défauts et des sondes de formes complexes. De plus, les modèles 2D et 3D par éléments finis offrent la possibilité d'incorporer des propriétés matérielles complexes.

# **Chapitre III : Simulation 2D - 3D et Analyse des Résultats**

### III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons exposer la méthode de détection des défauts en utilisant le contrôle par flux de fuite magnétique dans le contexte d'un problème électromagnétique. Nous allons utiliser les logiciels multiphysique FEMM (2D) et COMSOL (3D), une des plateformes logicielles de simulation haut de gamme qui permet aux étudiants, ingénieurs, scientifiques et chercheurs de modéliser, simuler et optimiser des systèmes physiques. Celui-ci offre un cadre polyvalent pour résoudre des problèmes multiphysiques et multi-échelles, ce qui en fait un outil précieux dans différents domaines, tels que l'ingénierie, la physique et les arts.

Le logiciel FEMM est principalement utilisé pour les simulations en 2D, où il permet de résoudre des problèmes magnétiques. La performance d'imagerie de COMSOL est exceptionnelle, sa géométrie de bâtiments est facile à réaliser dans toutes les dimensions spatiales et sa méthode par éléments finis (MEF) est optimisée. Cette méthode est utilisée pour résoudre des problèmes mathématiques complexes en électromagnétique ou en dynamique des fluides, comme le transfert de chaleur, l'acoustique, etc.

### III.2 Simulation 2D : (En utilisant FEMM)

#### III.2.1 Présentation du Logiciel FEMM

Ce logiciel comporte une série de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence, en plan 2D ou axisymétriques, développé par David Meeker, il se divise en 03 parties :

- *femm.exe* : Ce programme contient l'interface graphique du logiciel et est constitué de deux parties très importantes : le pré processeur et le post processeur.
- *Le pré processeur* : permet de fixer la géométrie du problème, propriétés des matériaux ainsi que les conditions aux limites, pour définir la géométrie d'un domaine d'étude on suit les étapes suivantes :
  - ✓ On place les nœuds correspondant à sa géométrie puis on les connecte par des segments de droites ou d'arcs selon le problème étudié.
  - ✓ Définition des matériaux caractérisant les différentes régions du domaine en utilisant une bibliothèque locale.
  - ✓ Définir le schéma ou les données des sources (courant, densité de courant).
  - ✓ Indiquer les conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude.

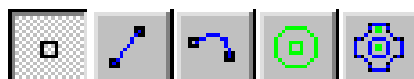
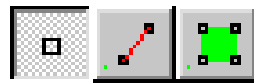


Figure III.1 Les boutons de création dans FEMM



Pour y arriver, le pré processeur utilise cinq modes différents : Mode Point, Mode Segment, Mode Arc, Mode Bloc et Mode Groupe. [19]

- **Le post processeur** : il affiche les résultats de l'analyse du problème sous forme de contour, densité de flux, graphe..., il peut fonctionner en trois modes différents :
  - ✓ **Mode Point** : utilisé pour relever les valeurs du champ dans différents points du domaine.
  - ✓ **Mode Contour** : utilisé pour relever et tracer le long d'un contour diverses grandeurs comme la composante normale de l'induction, composante tangentielle du champ, le couple...etc.
  - ✓ **Mode Bloc** : permet de définir des sous domaines afin d'obtenir l'énergie magnétique, la Co énergie, l'inductance et d'autres grandeurs en utilisant des intégrales de surfaces ou de volumes.



**Figure III.2** Modes du post processeur FEMM.

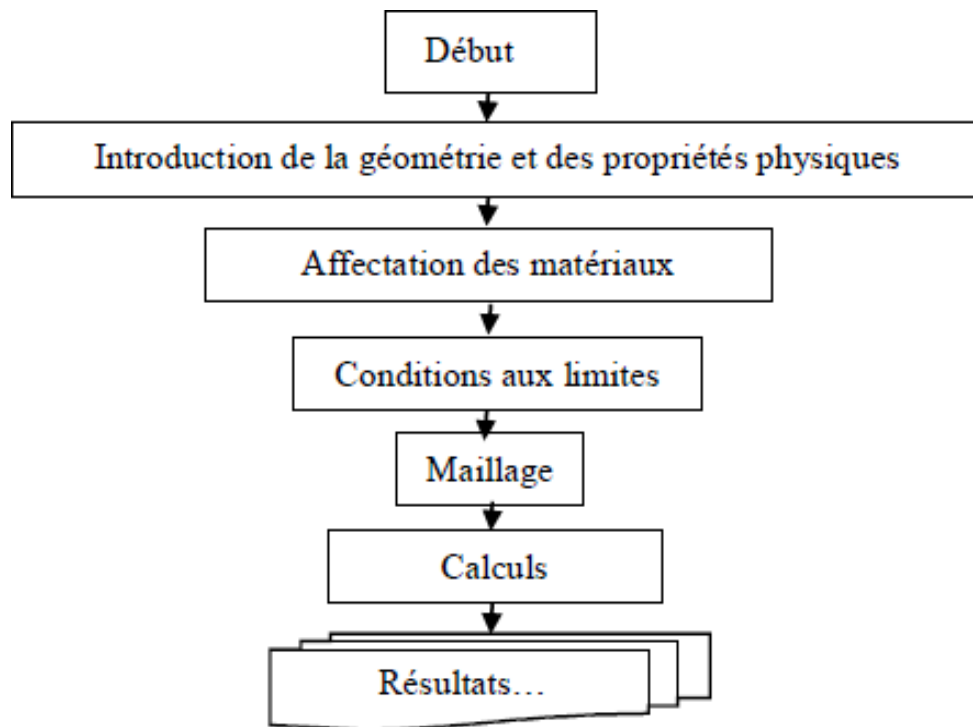
- **triangle.exe** : découpe les régions du domaine obtenu en éléments triangles pour effectuer l'analyse par éléments finis (maillage triangulaire), le potentiel vecteur est approché par un polynôme du premier degré.
- **fkern.exe** : représente le Solver du logiciel, il résout les EDP pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié, après la résolution des EDP par la formulation variationnelle, les équations algébriques non linéaires sous formes matricielle obtenues par la discrétisation et dont les inconnus représentent les valeurs nodales du potentiel vecteur, seront résolus par la méthode du gradient conjugué.

La figure suivante présente les boutons permettant d'accéder au maillage, au solver ainsi qu'aux résultats obtenus : [19]



**Figure III.3** Boutons de maillage et d'analyse du logiciel FEMM

La figure suivante présente les différentes étapes de calcul sous FEMM :



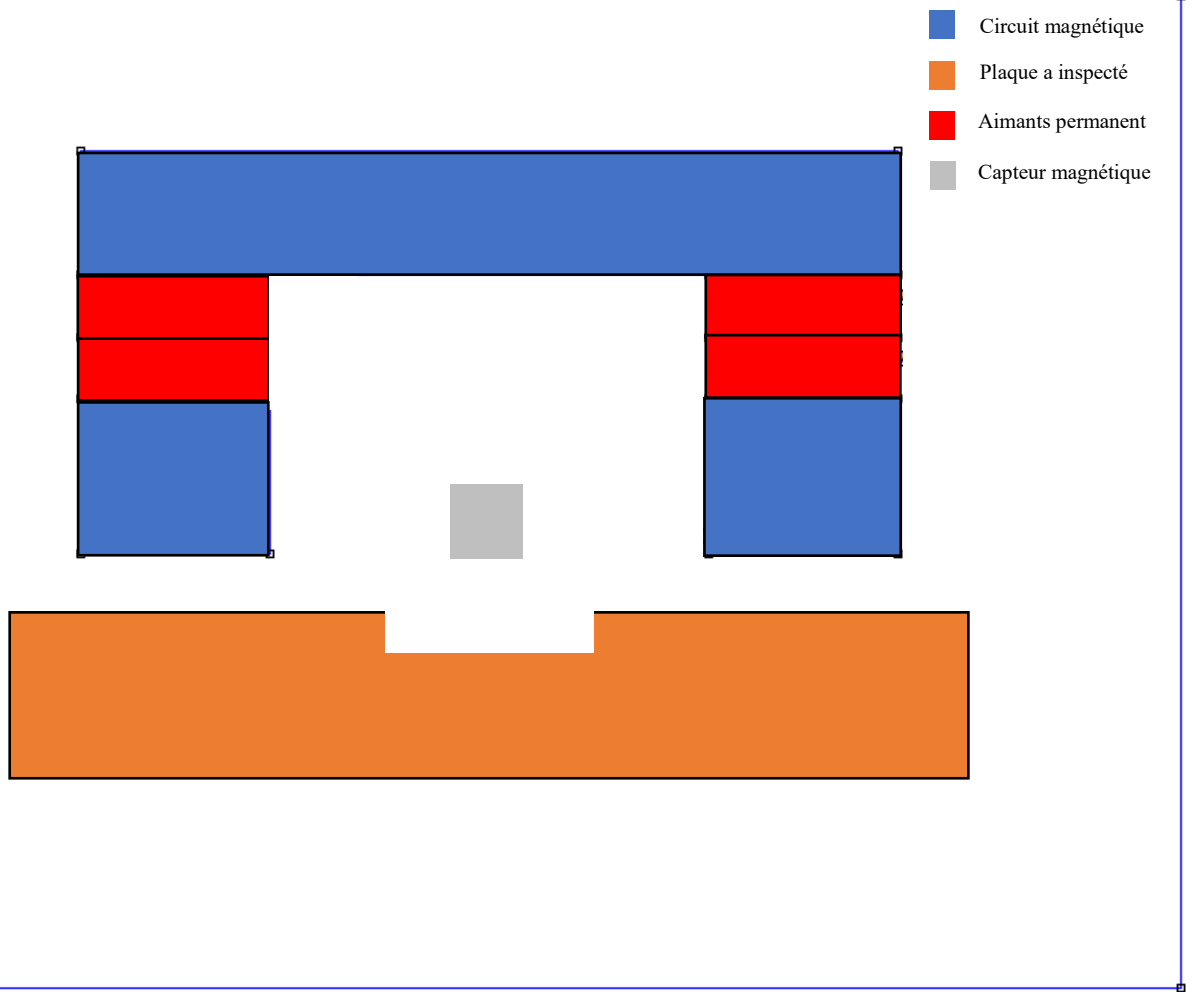
**Figure III.4** Les différentes étapes de calcul sous FEMM

### III.2.2 La géométrie du dispositif étudié

Avant de représenter le système, quelques hypothèses simplificatrices sont mises en place, à savoir :

- Le système d'analyse est en deux dimensions (bidimensionnelle).
- La source de courant du système est absente (purement magnétique  $J=0$ ).

Une fois que la structure complète a été tracée en 2D, les différentes régions du dispositif ont été attribuées aux matériaux nécessaires à la conception et les conditions aux limites ( $A=0$ ) ont été définies, la géométrie des régions du dispositif étudié est illustrée par la figure suivante (II.5):



**Figure III.5** Les régions du dispositif étudié tracée par FEMM

D'après la figure (III.5), on peut identifier cinq régions principales (quatre aimants composent 1 région) qui composent le dispositif. Chacune de ces zones est définie par un matériau spécifique. Comme le montre le tableau ci-dessous :

**Tableau III-1.** Différentes régions du dispositif et leurs matériaux.

Région	Matériau
La plaque à inspecter	Acier M-50
Le circuit ferromagnétique	Acier M-50
Capteur magnétique	Silicium dopée
L'entrefer	Air
Les aimants permanents	NdFeB 52 MGOe

### III.2.2.1 Les propriétés physiques principales

D'après le tableau (III.1), nous allons entrer les propriétés physiques des matériaux mentionnés précédemment qui composent le dispositif. Comme le montre le tableau (III-2) :

**Tableau III-2.** Les propriétés physiques principales des matériaux du dispositif

	Conductivité électrique (MS/m)	Perméabilité magnétique
Acier M-50	5.51	$B = \mu r(H) H$
NdFeB 52 MGOe	0.667	1.05
Air	0	1
Silicium dopée	1000	1

### III.2.2.2 Dimensions principales du dispositif étudié

La géométrie du dispositif étudié est constituée d'un circuit ferromagnétique (de forme U) et d'une plaque en acier. Le capteur est constitué d'un matériau Semi-conducteur, tandis que la plaque contient un défaut. Le tableau (III-3) montre les dimensions géométriques de la structure étudiée :

**Tableau III-3.** Dimensions principales du dispositif.

Nombre des aimants	4	La forme du noyau	En U
Longueur de la plaque (mm)	30	Epaisseur de la plaque (mm)	5
Longueur de l'aimant (mm)	6	Epaisseur de l'aimant (mm)	4
Longueur de défaut (mm)	6	Profondeur de défaut (mm)	1

### III.2.3 1<sup>ère</sup> Simulation

Dans le domaine de la simulation magnétique, les expressions « linéaire » et « non linéaire » désignent la nature de la relation entre le champ magnétique appliqué (H) et l'induction magnétique (B) du matériau simulé.

Dans cette première simulation, Nous allons analyser deux scénarios « Sans défaut » et « Avec défaut » présents à la surface de la plaque d'acier. Nous observerons la différence entre ces deux cas dans un contexte linéaire, où la perméabilité magnétique de l'acier reste constante.

#### III.2.3.1 Cas linéaire

La relation entre le champ magnétique appliqué (H) et le champ magnétique induit (B) est supposée proportionnelle et directe dans une simulation magnétique linéaire. La perméabilité magnétique  $\mu_r$  est constante.

Nous prenons la perméabilité magnétique relative  $\mu_r = 1000$  H/m.

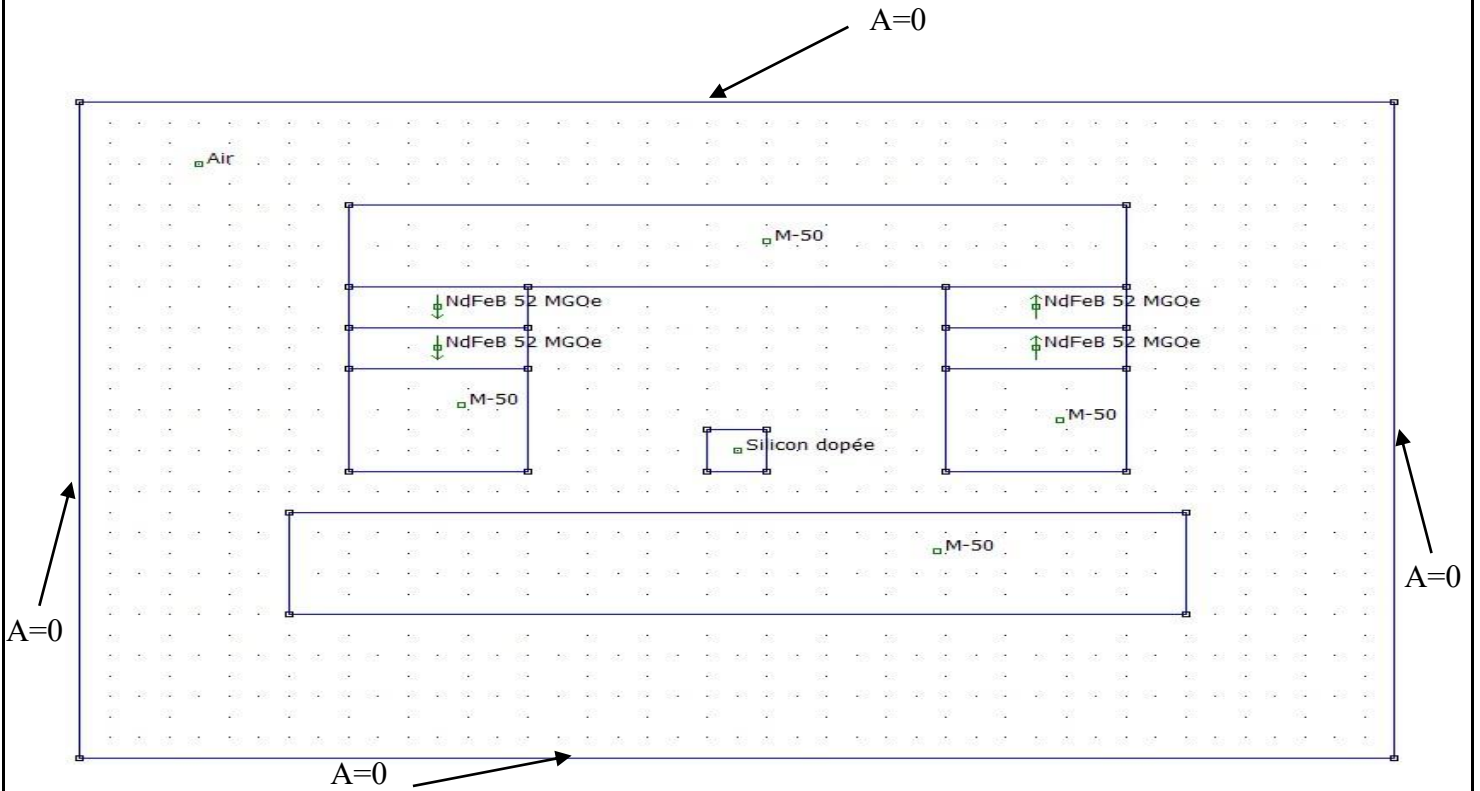
##### III.2.3.1.a) Sans défaut

Unités de longueur : Millimètres

2-D Planaire (Profondeur : 1 mm)

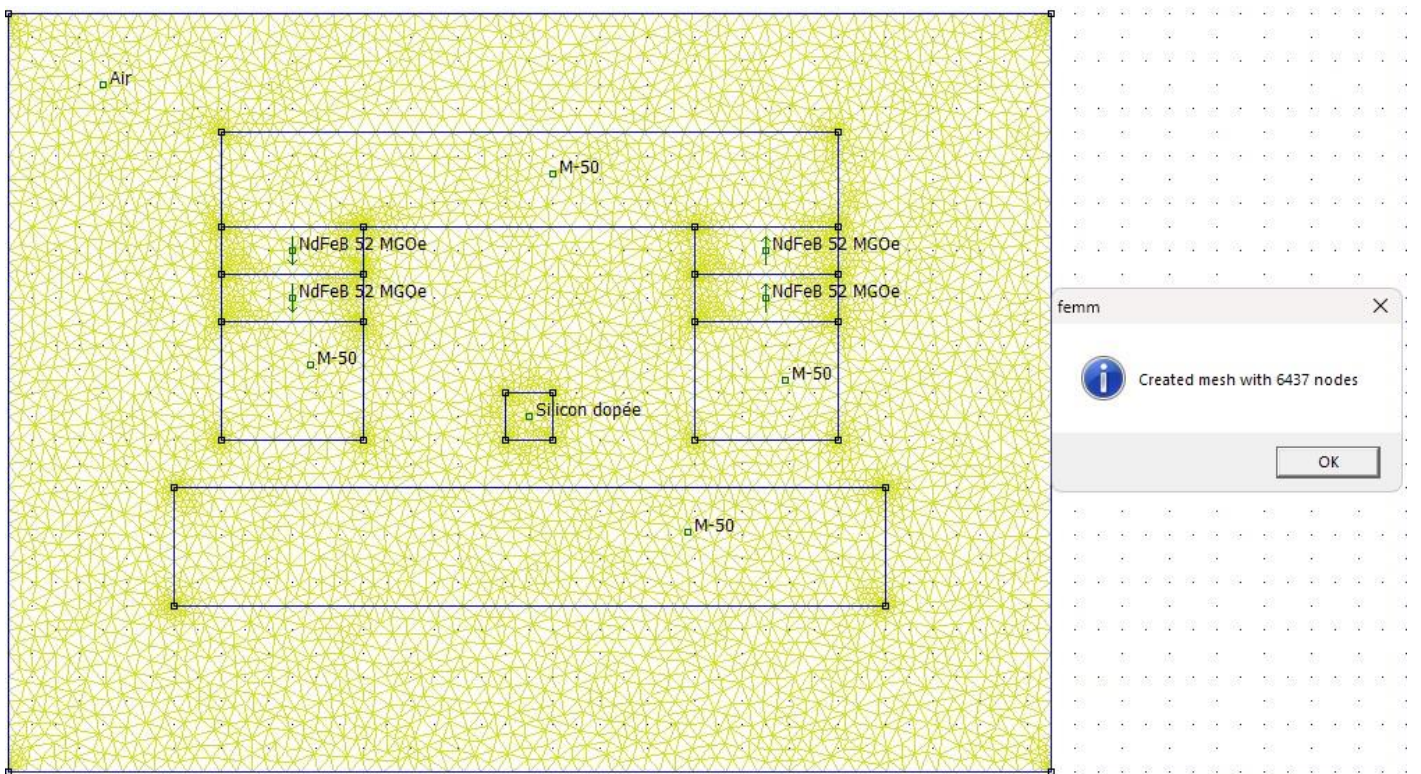
Maillage :

6435 nœuds 12602 éléments

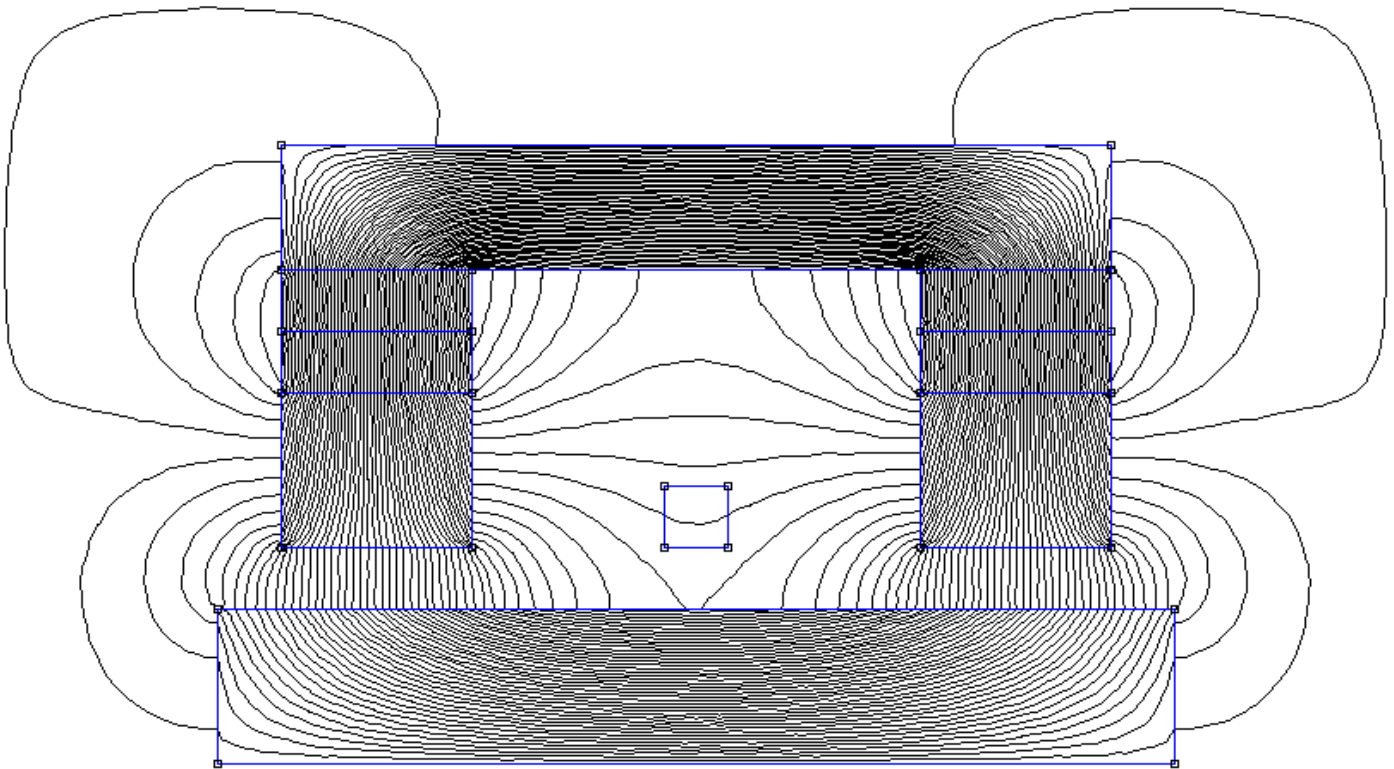


**Figure III.6** La géométrie du dispositif présenté dans le cas linéaire « Sans défaut »

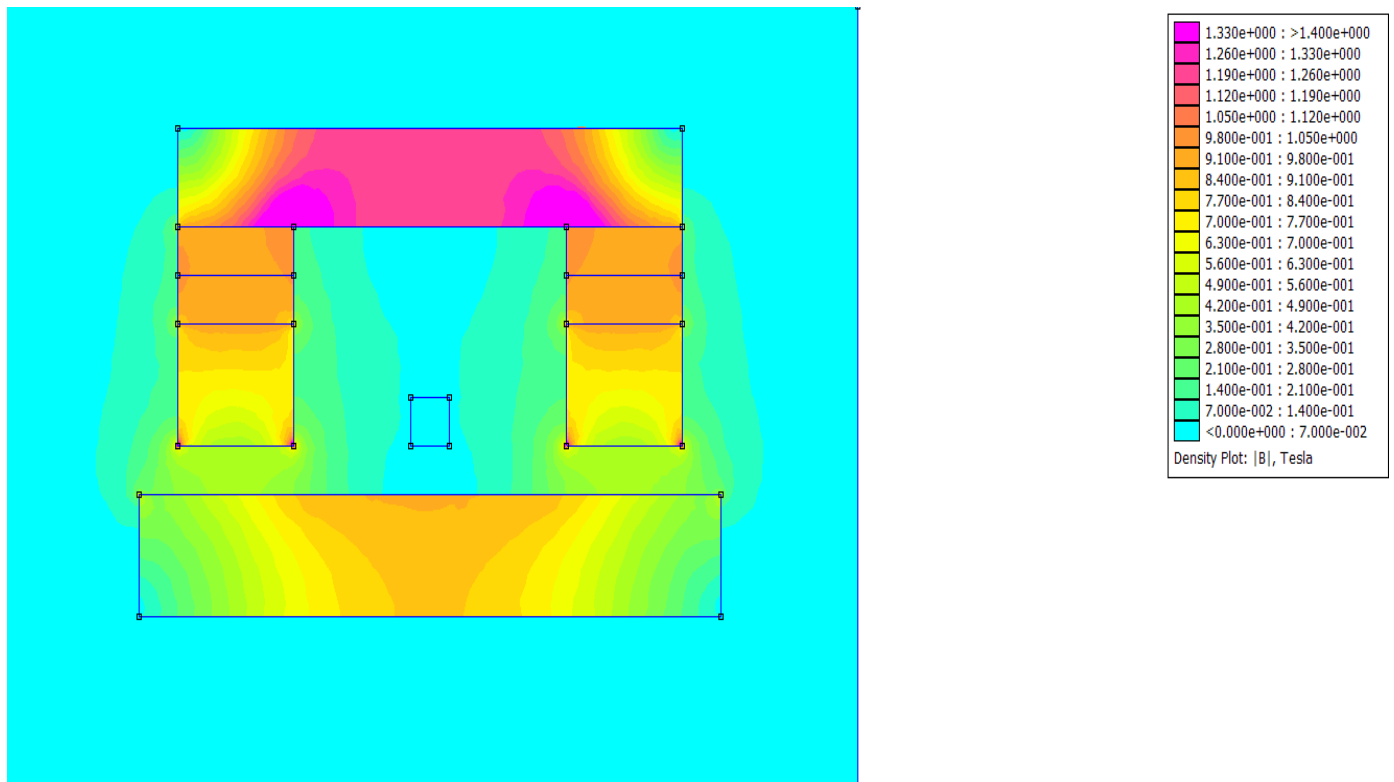
Le maillage du système étudié avec la prise en compte des conditions aux limites de Dirichlet ( $A=0$ ) sur les frontières est illustré par la figure (III.7) :



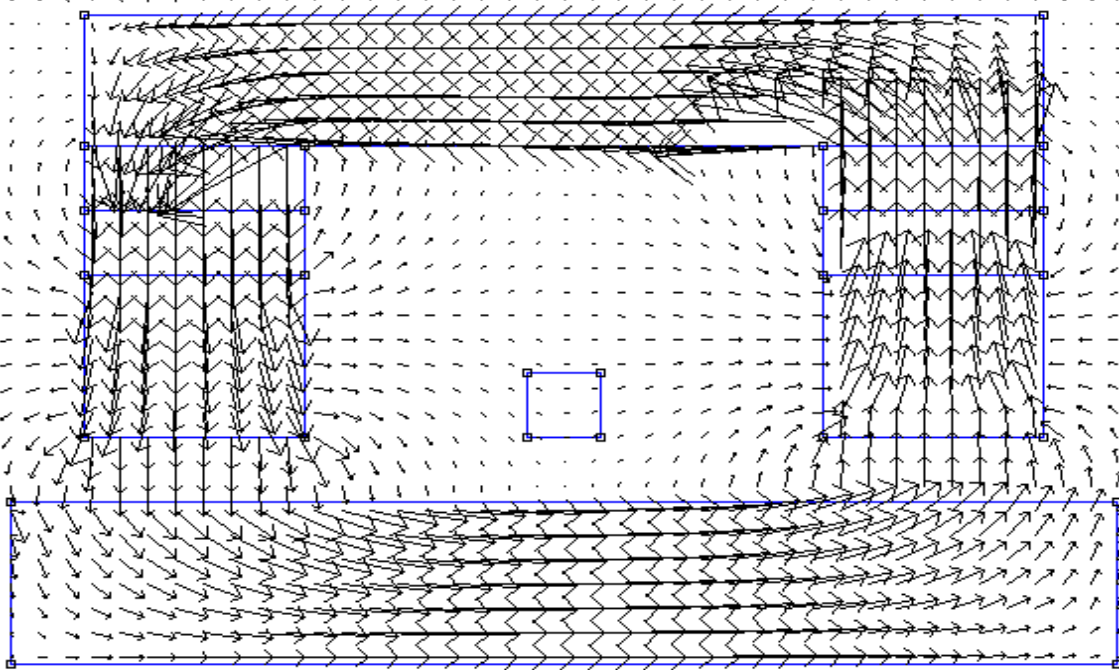
**Figure III.7** Le maillage du domaine d'étude dans le can linéaire « Sans défaut »



**Figure III.8** Les lignes de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut »



**Figure III.9** La densité de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut »



**Figure III.10** Les flèches de flux magnétique dans le cas linéaire « Sans défaut »

Energie magnétique totale dans la plaque d'acier = 0,0263 mJ
--------------------------------------------------------------

Densité de flux magnétique dans la plaque d'acier = 0,8494 T
--------------------------------------------------------------

### III.2.3.1.a).1 Interprétation des résultats

Dans cette simulation, nous avons utilisé le logiciel FEMM pour étudier la distribution de flux de fuite magnétique. Nous avons modélisé une plaque d'acier sans défaut avec une perméabilité relative de 1000 dans le cas linéaire. Un maillage de 6435 nœuds et 12602 éléments a été créé grâce à la simulation, ce qui nous permet de visualiser les lignes de flux magnétique, la densité de flux en dégradés de couleur, ainsi que les flèches de flux magnétique. Les résultats indiquent que la plaque d'acier présente une énergie magnétique totale de 0,0263 mJ, avec une amplitude maximale de la densité de flux magnétique située à 0,8494 T. Les résultats suggèrent une distribution homogène du champ magnétique sans perturbations, ce qui indique l'absence de défauts dans la plaque examinée.



### III.2.3.1.b) Avec défaut

Unités de longueur : Millimètres

2-D Planaire (Profondeur : 1 mm)

Maillage :

6972 nœuds

13681 Éléments

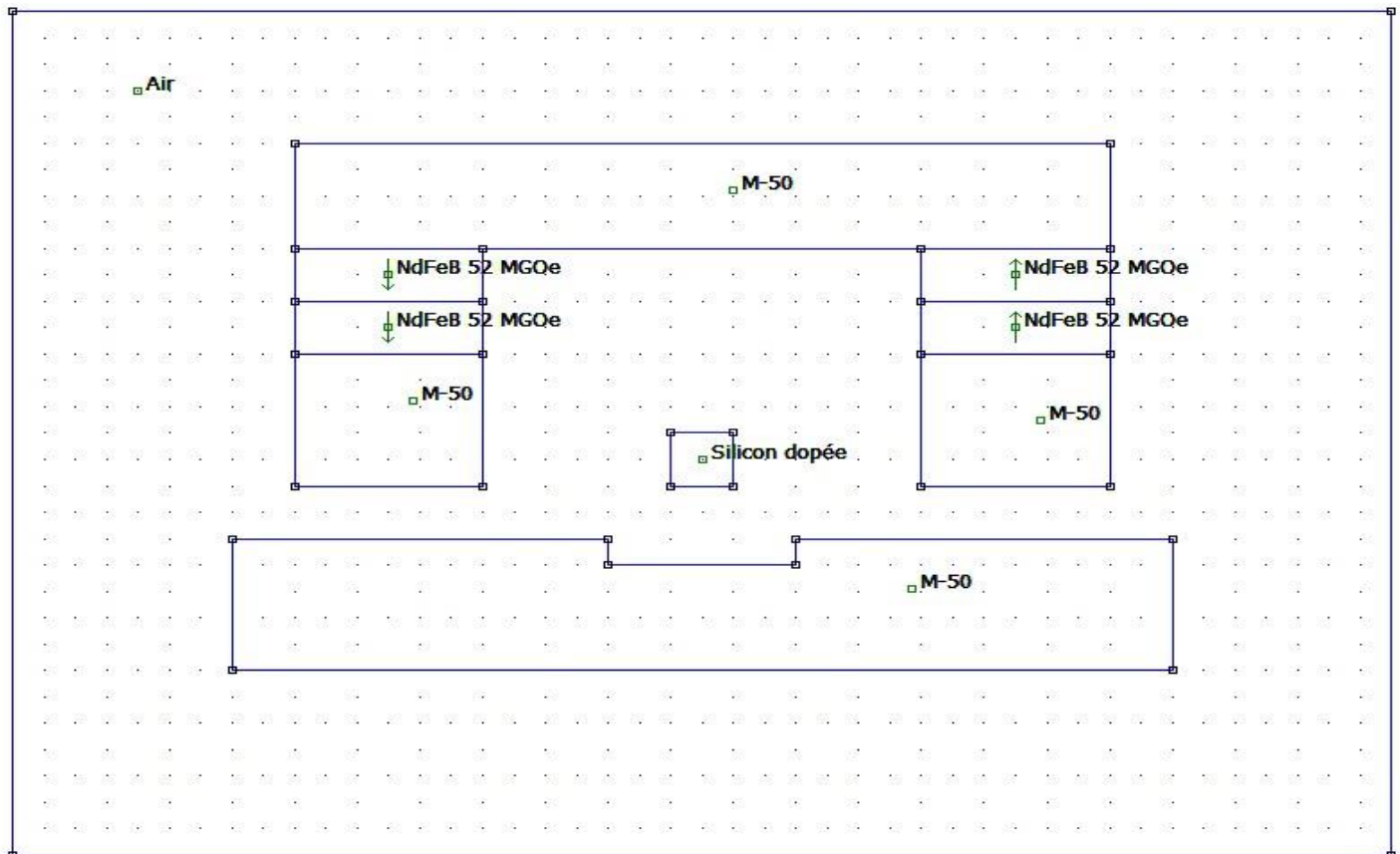
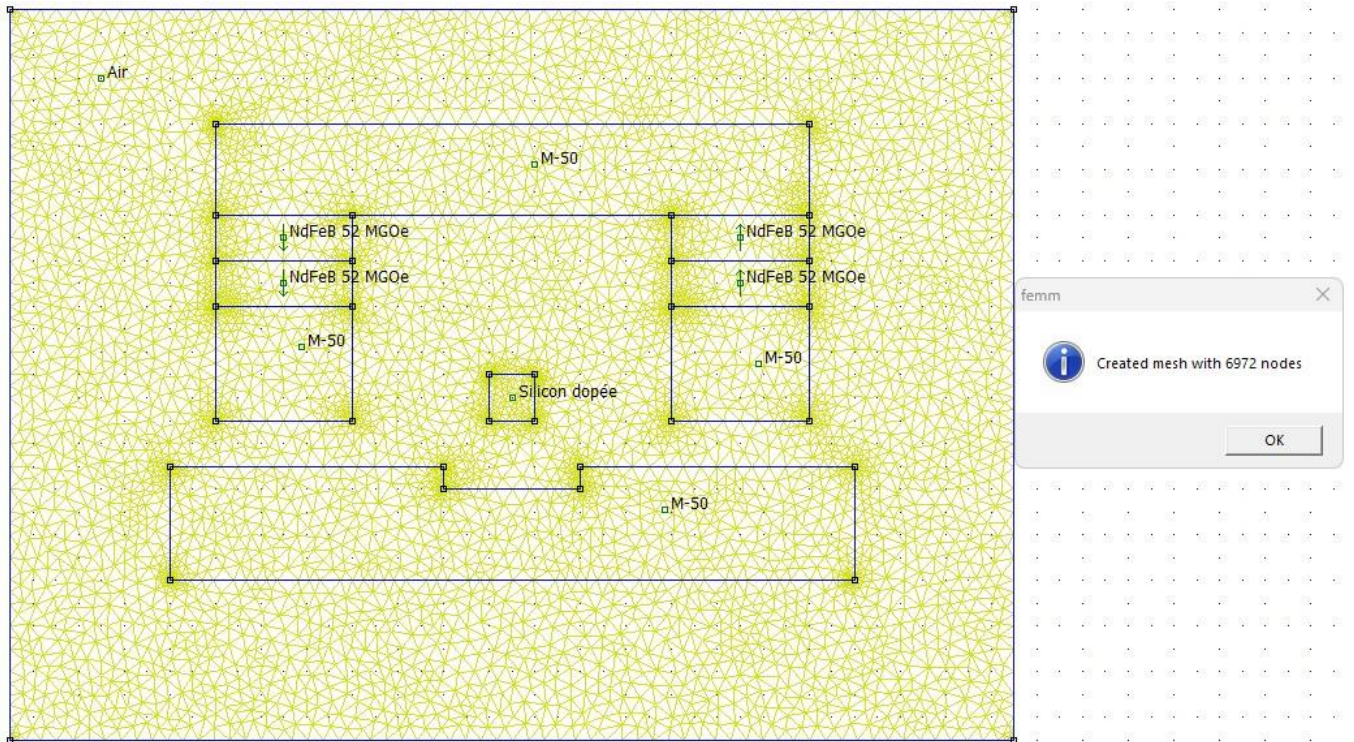
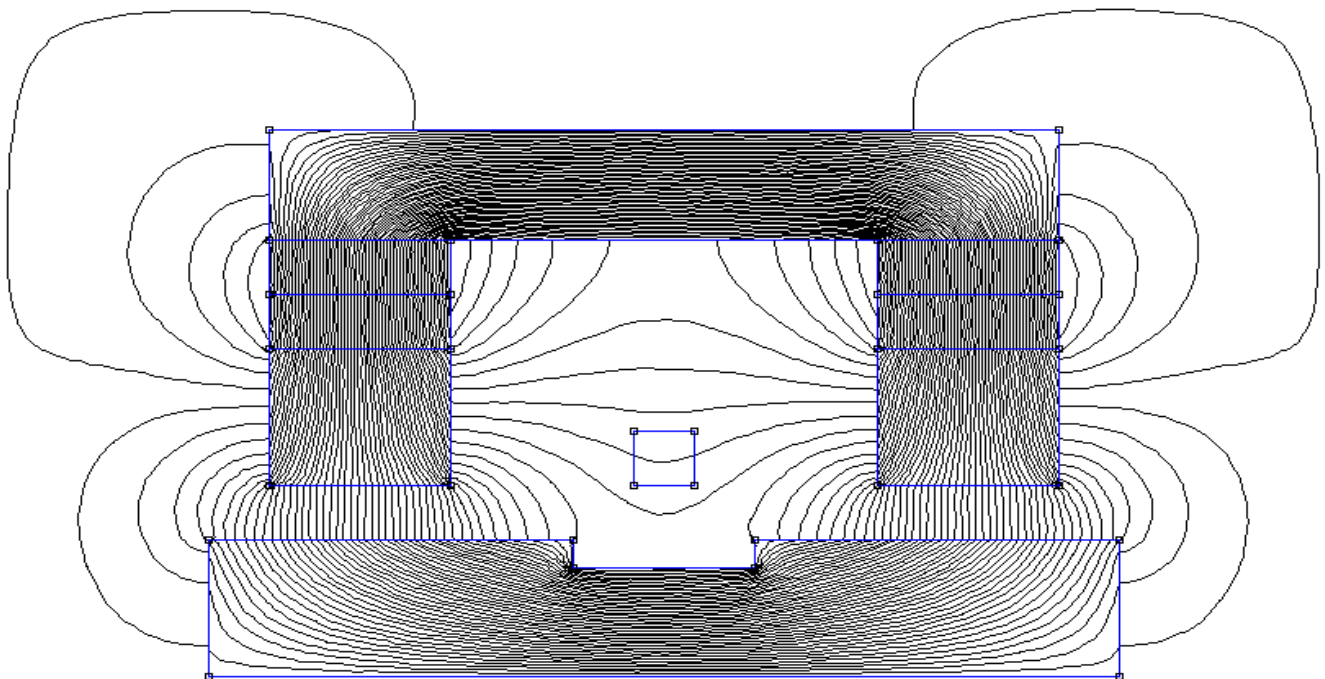


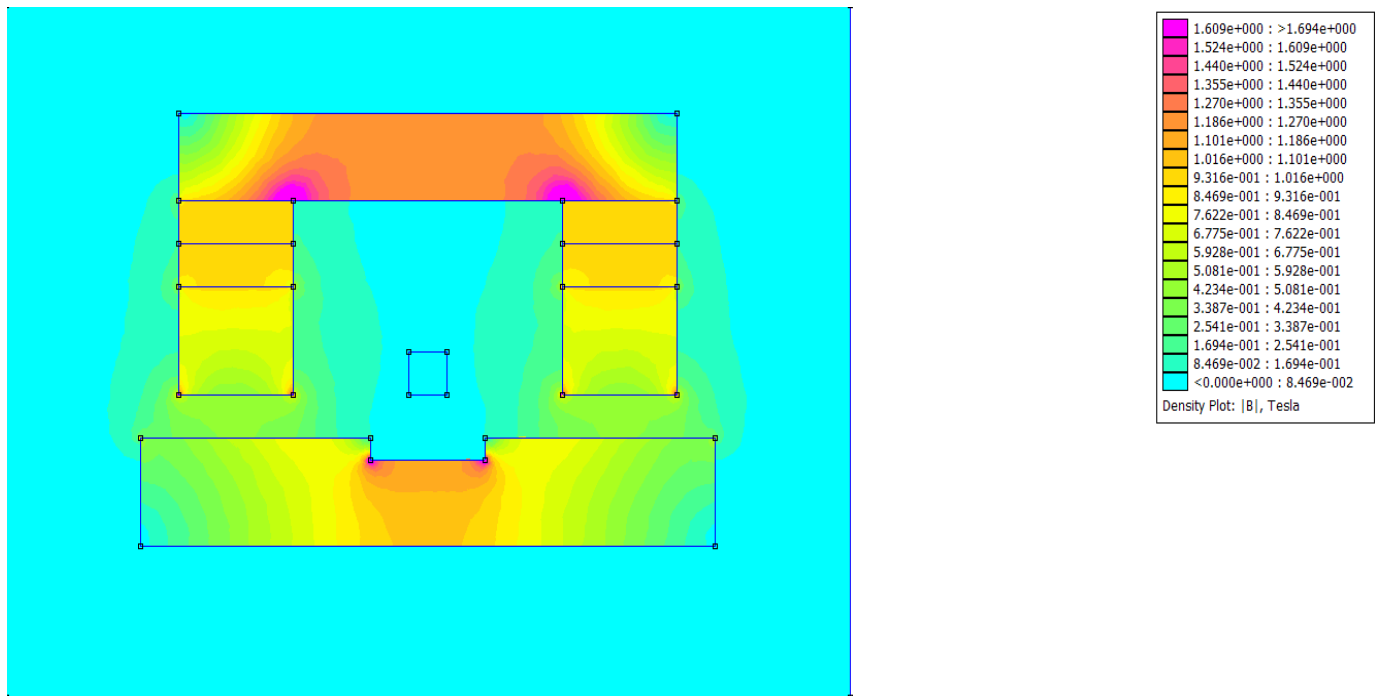
Figure III.11 La géométrie du dispositif étudié dans le cas linéaire « Avec défaut »



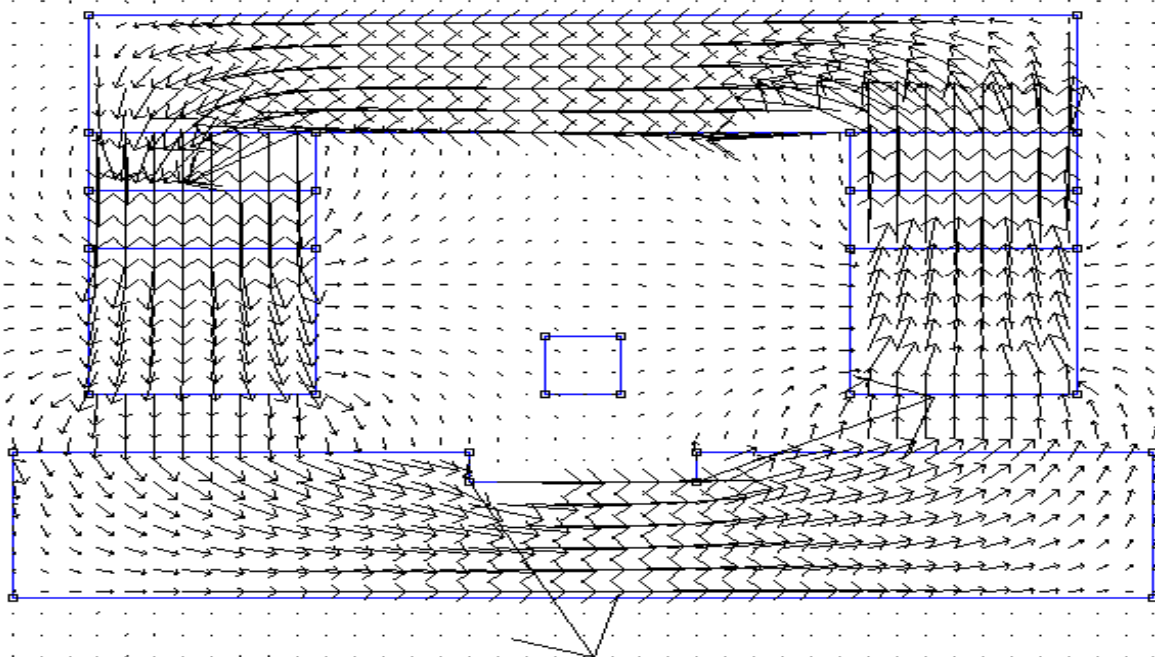
**Figure III.12** Le maillage du domaine d'étude dans le cas linéaire « Avec défaut »



**Figure III.13** Les lignes de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut »



**Figure III.14** La densité de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut »



**Figure III.15** Les flèches de flux magnétique dans le cas linéaire « Avec défaut »

Energie magnétique totale dans la plaque d'acier = 0,0295 mJ

Densité de flux magnétique dans la plaque d'acier = 1,0454 T

### III.2.3.1.b).1 Interprétation des résultats

Dans le cas d'un défaut, le maillage du domaine augmente à 6972 nœuds et à 13681 éléments, ce qui permet une analyse améliorée. On peut observer des perturbations dans les lignes de flux magnétique et des fluctuations de la densité de flux en utilisant des couleurs différentes. Les flèches de flux magnétique représentent des variations dans les directions du flux autour du défaut. D'après les résultats, on observe une énergie magnétique totale de 0,0295 mJ et une amplitude maximale de la densité de flux magnétique de 1,0454 T. Par rapport à la situation sans défaut, où l'énergie magnétique était de 0,0263 mJ et l'amplitude de la densité de flux magnétique de 0,8495 T. Ces valeurs plus élevées suggèrent une perturbation causée par la présence du défaut, reflétée par une concentration accrue de flux magnétique et une énergie magnétique légèrement plus élevée.

### III.2.3.2 Effet de variation des dimensions du défaut sur l'énergie magnétique et la densité de flux magnétique (linéaire)

Après avoir défini les dimensions de la plaque à inspecter et du défaut. On procède en premier lieu à l'étude de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.

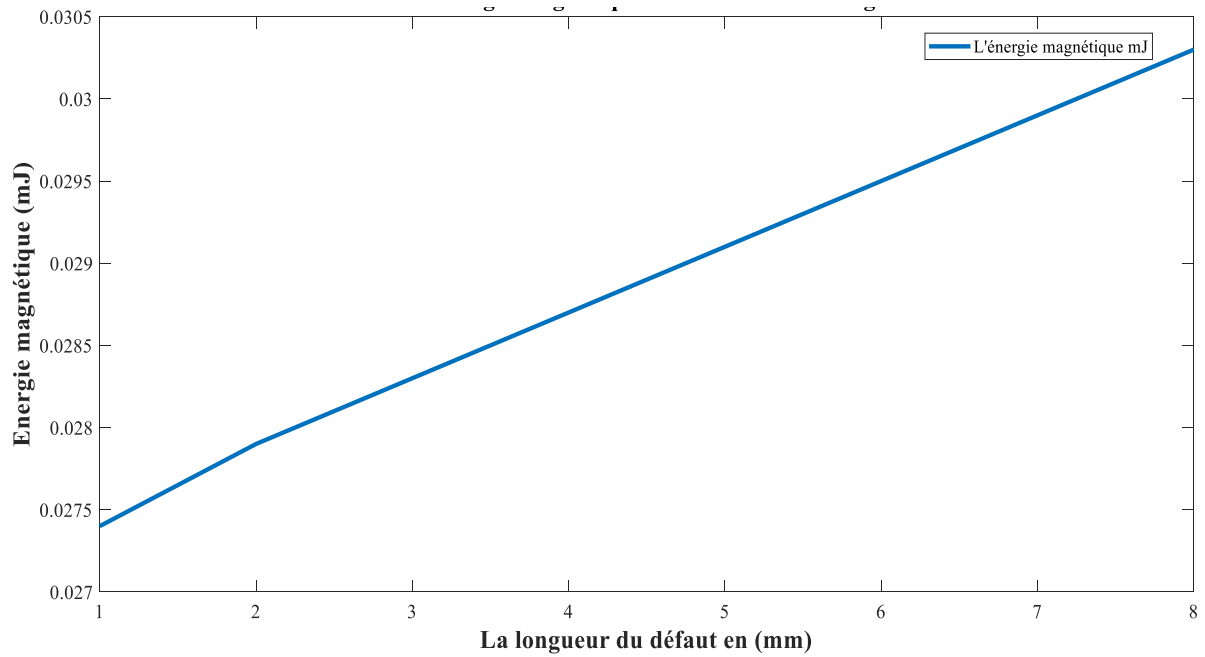
Dans un second lieu, nous allons voir l'impact de la variation de la profondeur du défaut sur l'énergie magnétique totale ainsi que sur la densité de flux magnétique.

#### III.2.3.2.a) Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

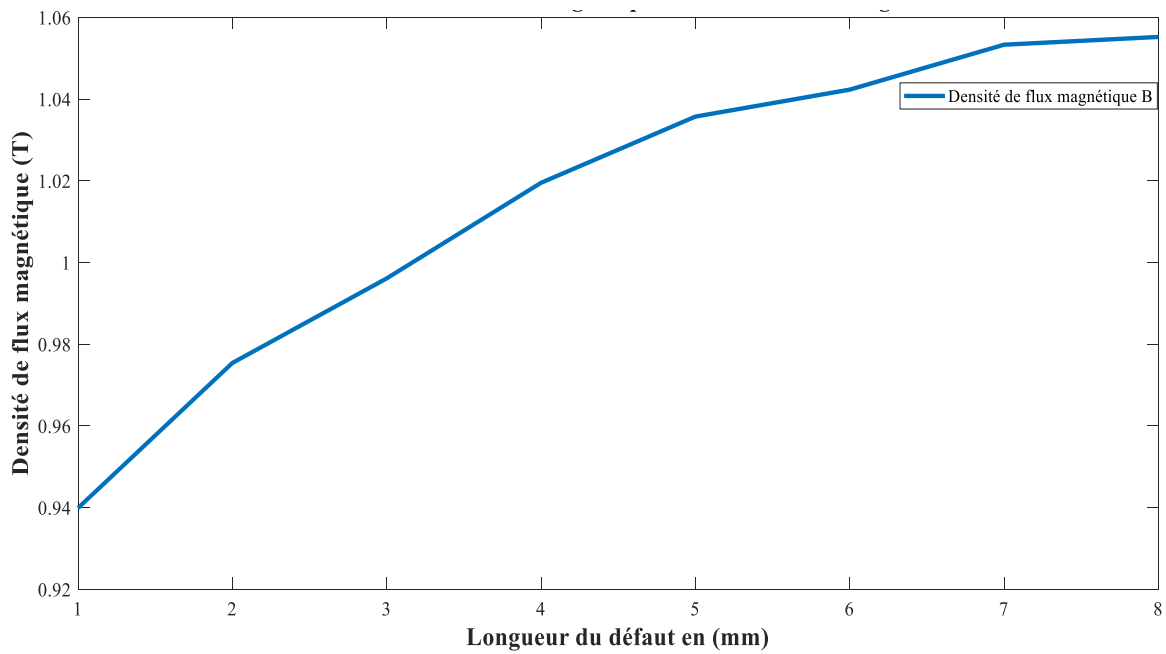
Dans cette étude, nous allons varier la longueur du défaut de 1mm à 8mm et nous allons fixer la profondeur à 1mm.

**Tableau III-4.** Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.

Longueur du fissure (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Energie magnétique (mJ)	0,0274	0,0279	0,0283	0,0287	0,0291	0,0295	0,0299	0,0303
Densité de flux magnétique (T)	0,9399	0,9754	0,9961	1,0195	1,0357	1,0423	1,0533	1,0552



**Figure III.16** La variation de l'énergie magnétique en fonction de la longueur du défaut



**Figure III.17** La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la longueur du défaut

### III.2.3.2.a).1 Interprétation des résultats

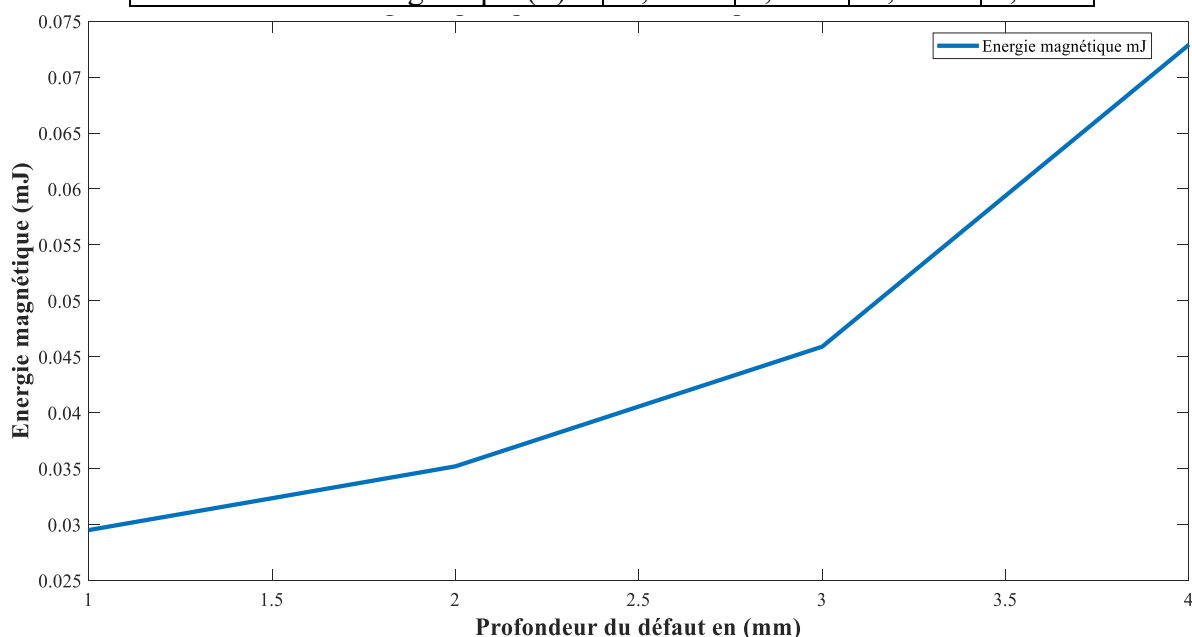
Dans cette étude, nous avons vu l'impact de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale. Nous avons augmenté la longueur du défaut de 1 mm à 8 mm tout en maintenant une profondeur constante de 1 mm. Les résultats indiquent que l'énergie magnétique totale et la densité de flux magnétique augmentent d'une manière proportionnelle avec la longueur du défaut. En particulier, la valeur de l'énergie magnétique varie de 0,0274 mJ pour un défaut de 1 mm à 0,0303 mJ pour un défaut de 8 mm. La densité de flux magnétique varie également de 0,9399 T à 1,0552 T dans la même plage de variation de longueur. Selon ces résultats, l'augmentation de la longueur du défaut entraîne une augmentation de la concentration du flux magnétique et de l'énergie magnétique dans la plaque d'acier. Nous pouvons constater aussi, que l'énergie magnétique totale et la densité de flux magnétique sont importantes par rapport au cas linéaire.

### III.2.3.2.b) Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

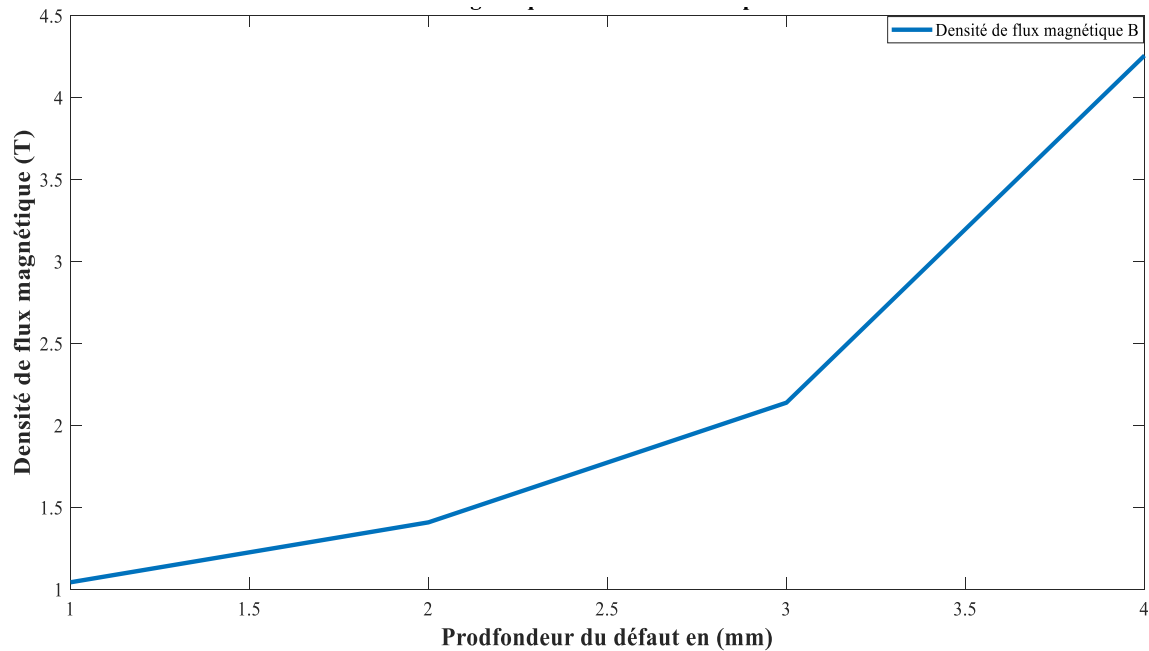
Dans cette partie, nous allons varier la profondeur du défaut de 1mm à 4mm et nous allons fixer la longueur à 6mm.

**Tableau III-5.** Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

Profondeur du fissure (mm)	1	2	3	4
Energie magnétique (mJ)	0,0295	0,0352	0,0459	0,0729
Densité de flux magnétique (T)	1,0423	1,4080	2,1381	4,2555



**Figure III.18** La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur du défaut



**Figure III.19** La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la profondeur du défaut


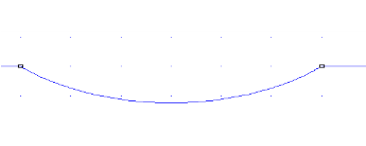
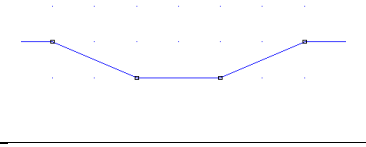
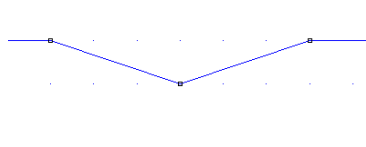
### III.2.3.2.b)1 Interprétation des résultats

Les résultats de cette partie, où la profondeur du défaut varie de 1 mm à 4 mm et la longueur être constante à 6 mm, montrent une tendance importante. L'énergie magnétique totale et la densité de flux magnétique augmentent de façon exponentielle au fur et à mesure que la profondeur du défaut augmente, de 1 mm à 4 mm. L'énergie magnétique totale augmente de 0,0295 mJ à 0,0729 mJ lorsque la profondeur du défaut passe de 1 mm à 4 mm, tandis que la densité de flux magnétique varie de 1,0423 T à 4,2552 T dans la même plage de variation. Ces résultats montrent l'importance de la profondeur du défaut sur l'effet global des caractéristiques magnétiques (E,B) de la plaque d'acier, mettant en évidence que les défauts plus profonds entraînent des variations magnétiques plus importantes.

### III.2.3.2.c) Effet de changement de la forme du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

Nous allons changer la forme du défaut puis, nous allons voir l'impact sur l'énergie magnétique totale et sur l'induction magnétique dans la plaque à inspecter comme le montre le tableau suivant :

**Tableau III-6.** Effet de la variation de la forme du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.

Forme du défaut	Densité de flux magnétique (T)	L'énergie magnétique (mJ)	
Rectangulaire	1,0839	0,0295	
Circulaire	1,0593	0,0289	
Piqûre	1,0444	0,0282	
Triangulaire	1,0168	0,0277	

### III.2.3.2.c.1 Interprétation des résultats

Au cours de cette comparaison de diverses formes de défauts, les résultats indiquent des différences dans la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale présentées dans la plaque à inspecter. La densité de flux magnétique la plus importante est celle de la forme rectangulaire à 1,0839 T, puis celle de la forme circulaire à 1,0593 T, de la piqûre à 1,0444 T et de la forme triangulaire à 1,0168 T. Sur le plan de l'énergie magnétique, la forme rectangulaire est également la plus élevée avec 0.0295, suivie de la forme circulaire avec 0,0289 mJ, de la piqûre avec 0,0282 mJ et de la forme triangulaire avec 0,277 mJ. Ces résultats mettent en évidence l'influence importante de la forme du défaut sur les caractéristiques magnétiques de la plaque, démontrant que les formes plus angulaires ont tendance à entraîner des variations magnétiques plus marquées que les formes plus arrondies.

### III.2.4 2<sup>ème</sup> Simulation

Dans la deuxième simulation, nous allons étudier les deux cas, « Sans défaut » et « Avec défaut », en observant les différences entre eux dans le contexte non linéaire (où la perméabilité magnétique de l'acier varie). La relation entre le champ magnétique appliqué (H) et l'induction (B) n'est pas proportionnelle dans une simulation magnétique non linéaire et dépend de l'intensité du champ. La perméabilité magnétique  $\mu_r$  n'est pas constante et elle varie considérablement avec le champ appliqué.



### III.2.4.1 Cas non-linéaire

La relation entre le champ magnétique appliqué (H) et l'induction (B) n'est pas proportionnelle dans une simulation magnétique non linéaire et dépend de l'intensité du champ. La perméabilité magnétique  $\mu_r$  n'est pas constante et elle varie considérablement avec le champ appliqué.

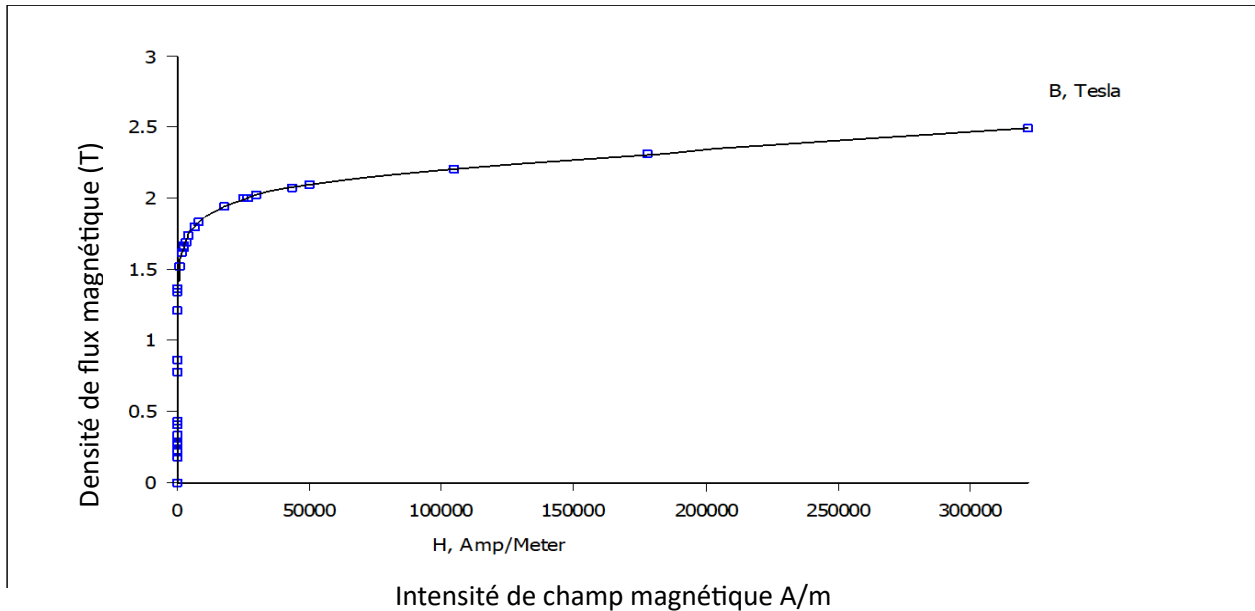


Figure III.20 Le courbe d'évolution de l'induction en fonction de l'intensité du champ magnétique

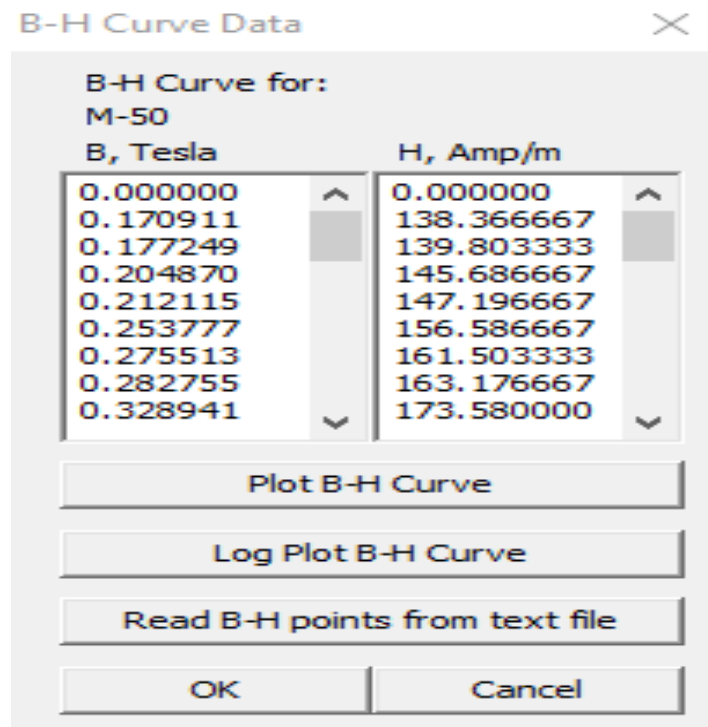


Figure III.21 La tableau d'évolution de l'induction B en fonction de l'intensité du champ magnétique H

### III.2.4.1.a) Sans défaut

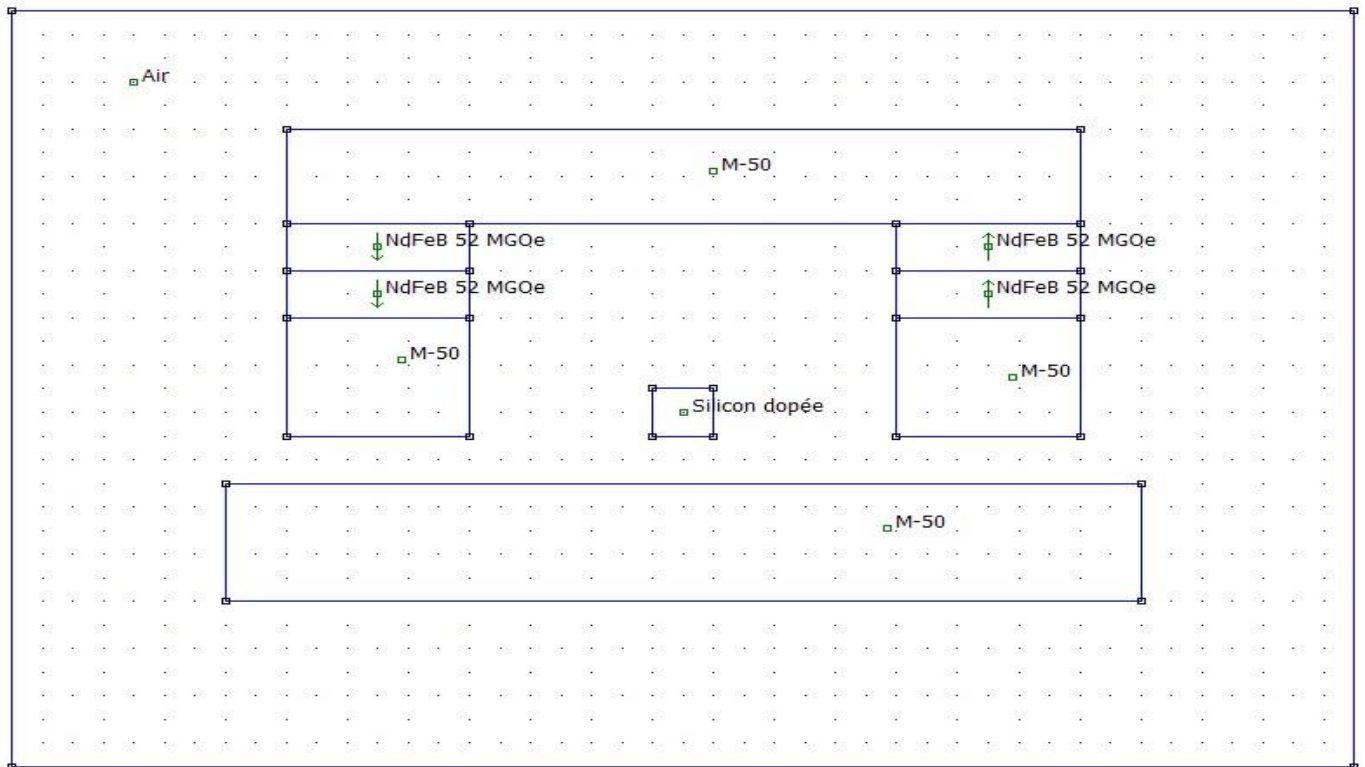
Unités de longueur : Millimètres

2-D Planaire (Profondeur : 1 mm)

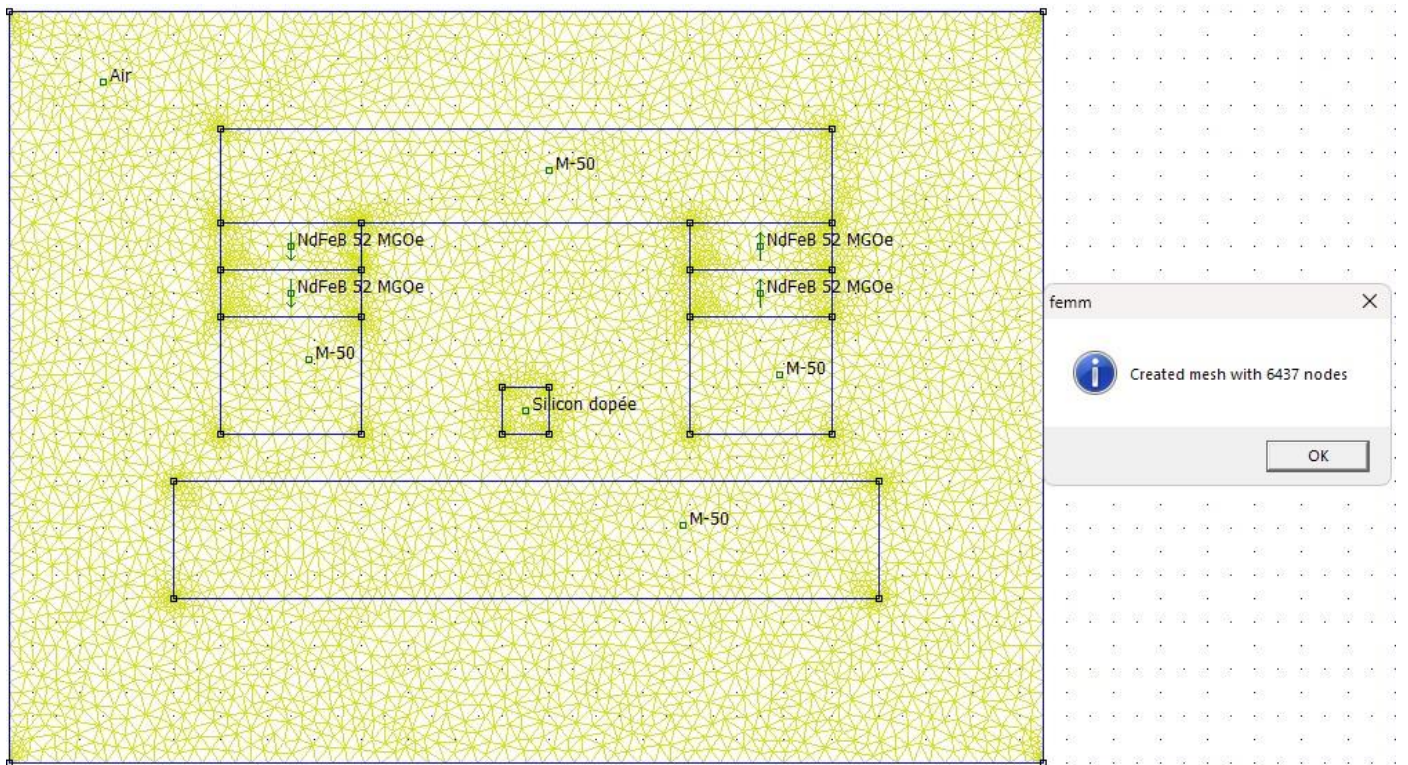
Maillage :

6435 nœuds

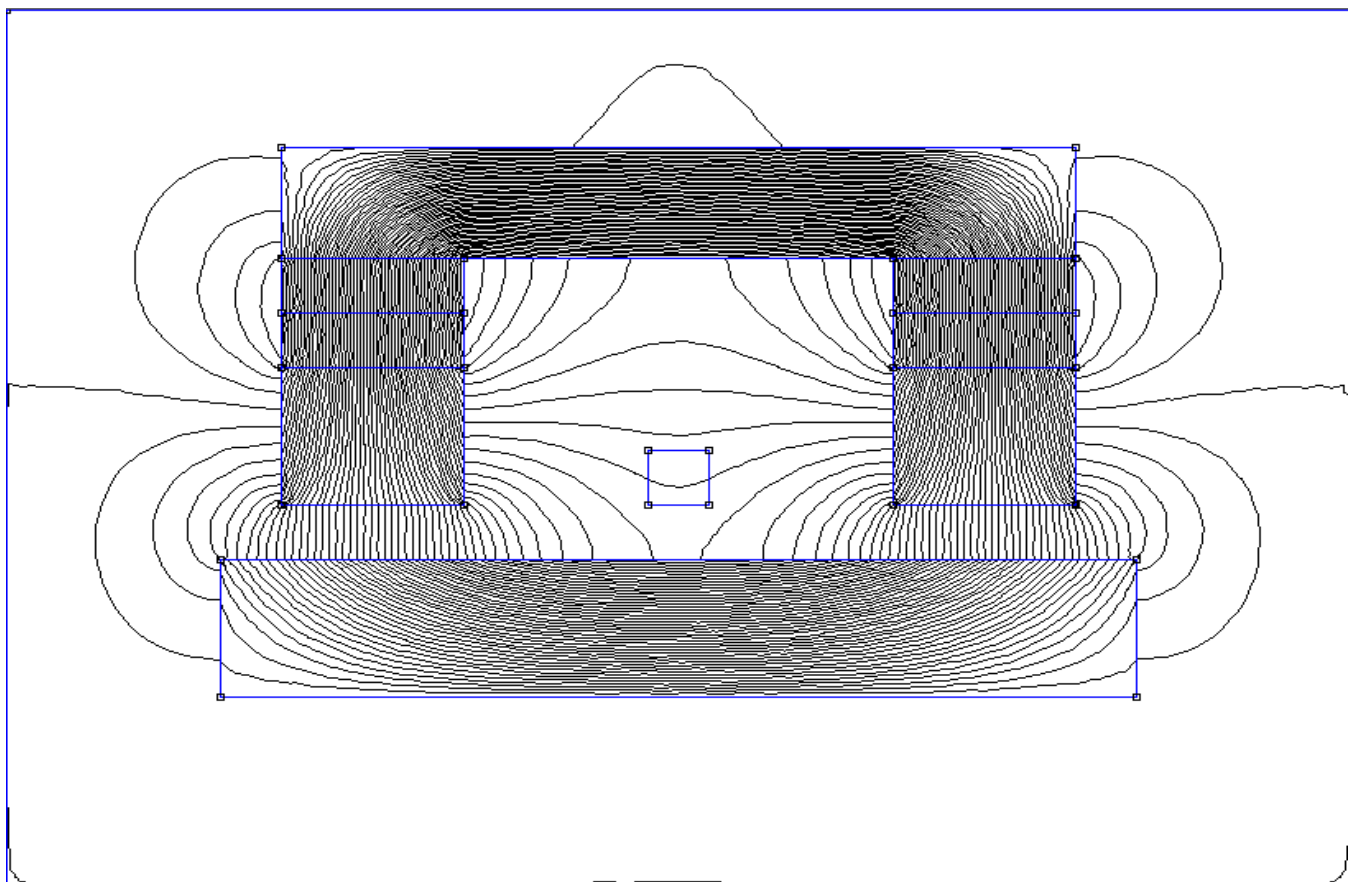
12602 éléments



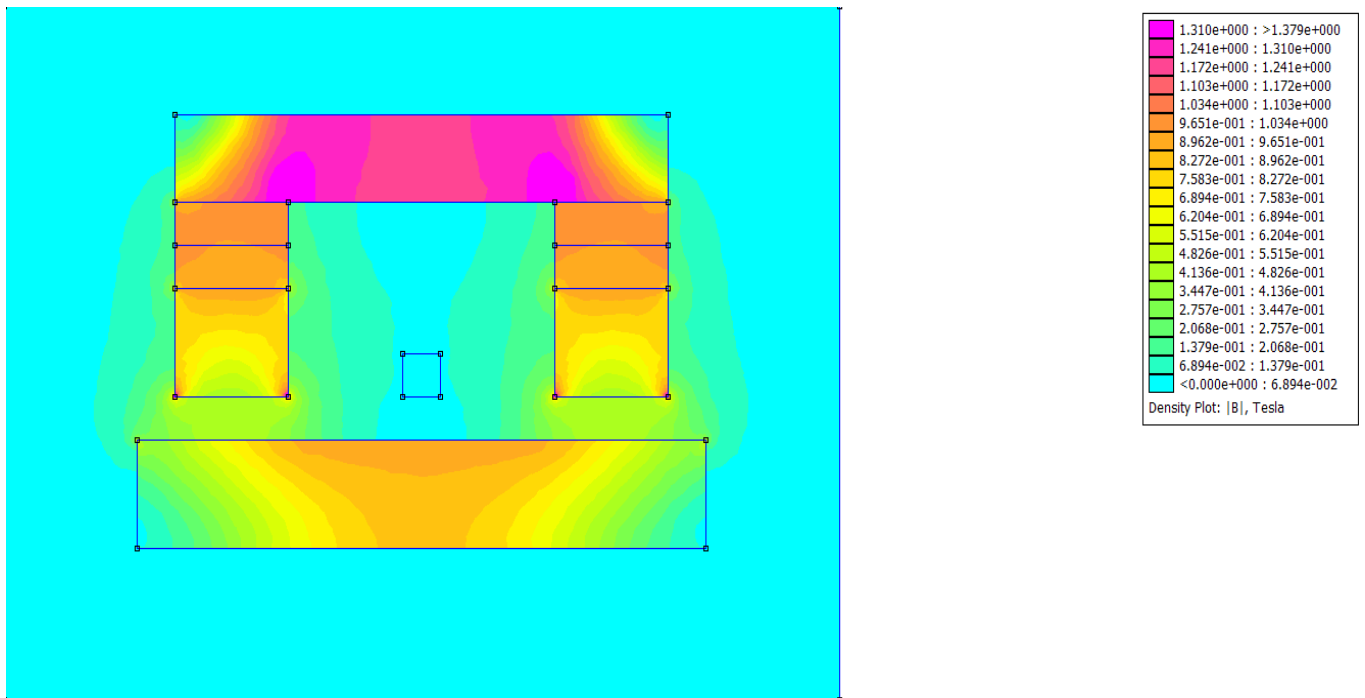
**Figure III.22** La géométrie du dispositif présenté dans le cas non linéaire « Sans défaut »



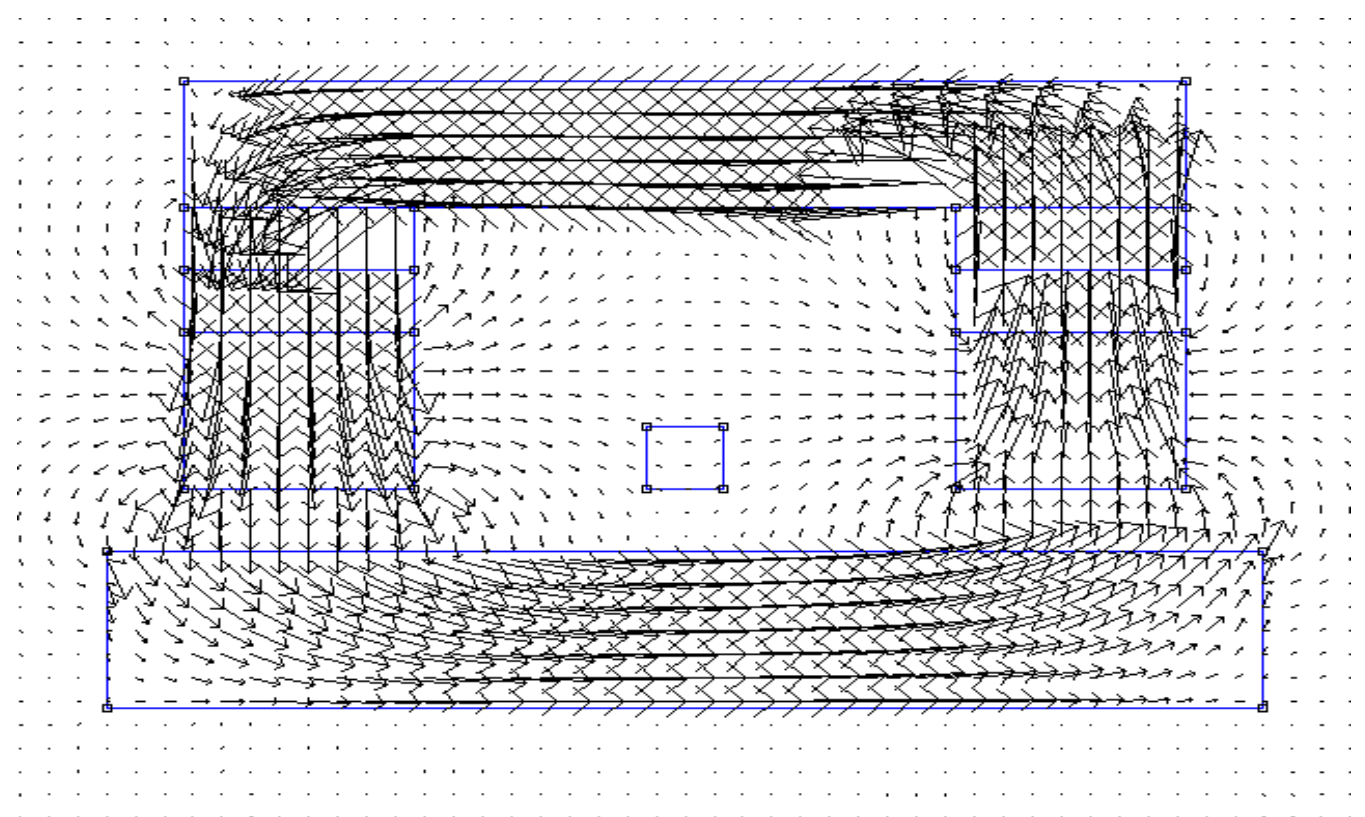
**Figure III.23** Le maillage du domaine d'étude dans le cas non-linéaire « Sans défaut »



**Figure III.24** Les lignes de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut »



**Figure III.25** La densité de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut »



**Figure III.26** Les flèches de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Sans défaut »

Energie magnétique totale dans la plaque d'acier = 0.0157 mJ

Densité de flux magnétique dans la plaque d'acier = 0.8495 T

### III.2.4.1.a).1 Interprétation des résultats

Dans cette simulation ; le cas sans défaut non linéaire, où le matériau examiné est l'acier avec une perméabilité relative variable, les résultats indiquent un maillage de 6435 nœuds et 12602 éléments constituant le domaine. La plaque d'acier présente une énergie magnétique totale de 0.0157 mJ, tandis que la densité de flux magnétique dans la plaque atteint 0.8495 T. Ces résultats indiquent que la répartition du champ magnétique dans le système change par rapport au cas linéaire, mais elle est restée répartie de manière ordinaire dans la plaque d'acier, ce qui fournit des informations précieuses sur ses caractéristiques magnétiques dans des conditions non linéaires.

### III.2.4.1.b) Avec défaut

Unités de longueur : Millimètres

2-D Planaire (Profondeur : 1 mm)

Maillage :

6972 nœuds

13681 Éléments

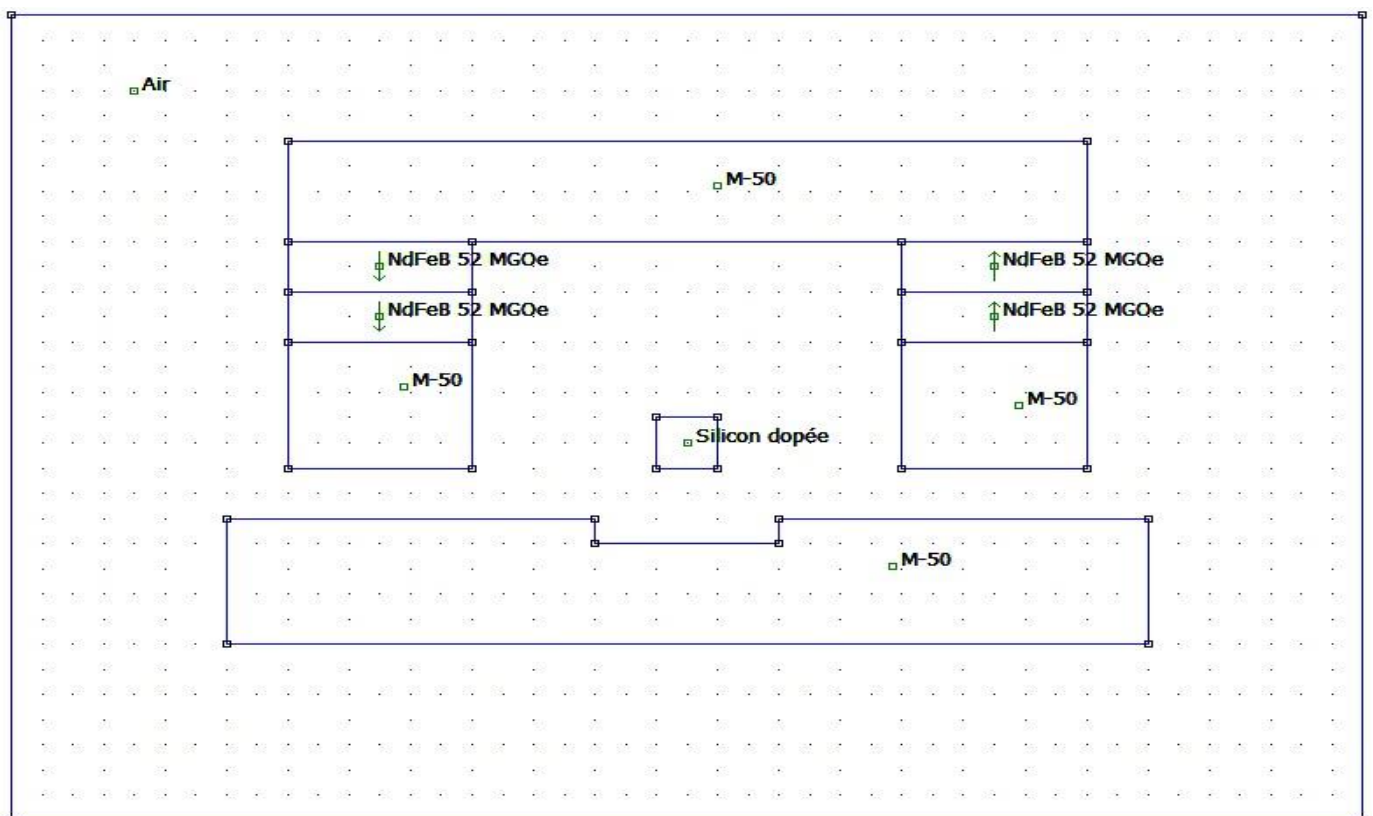
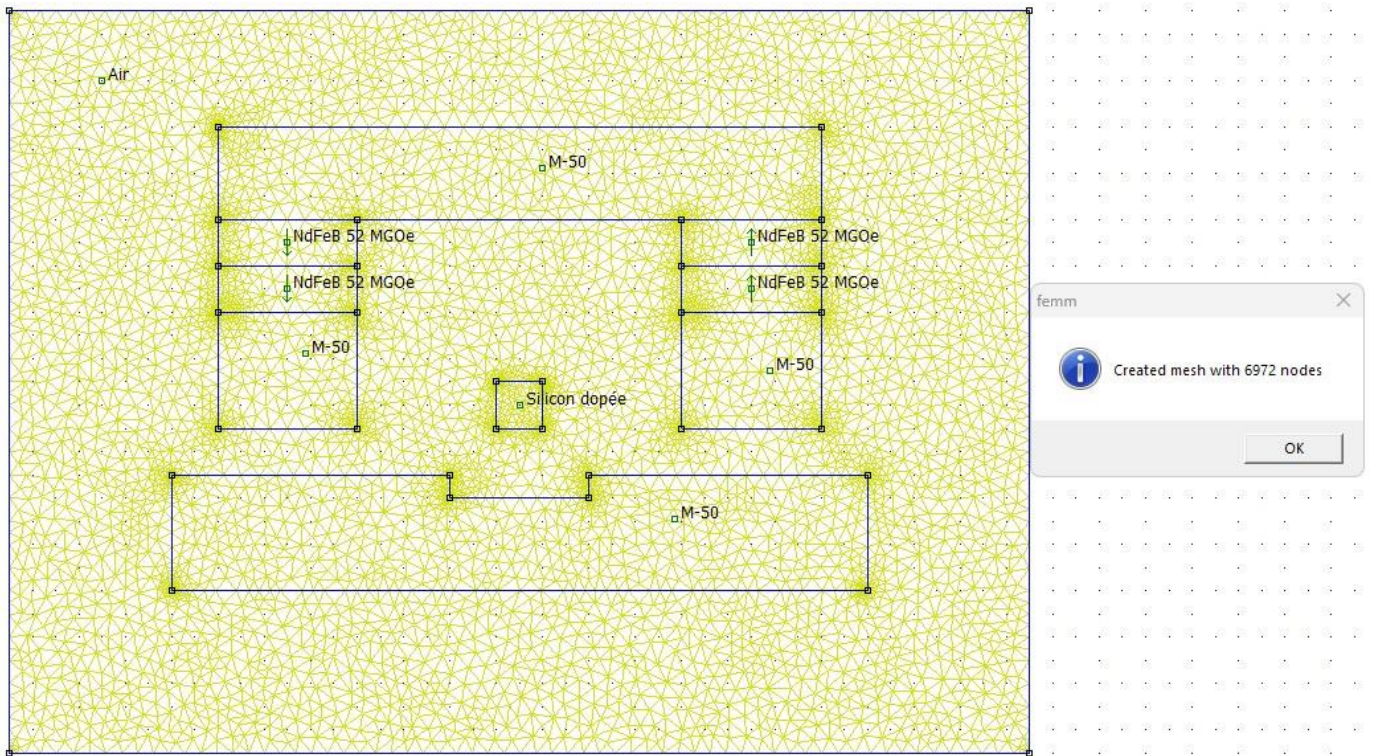
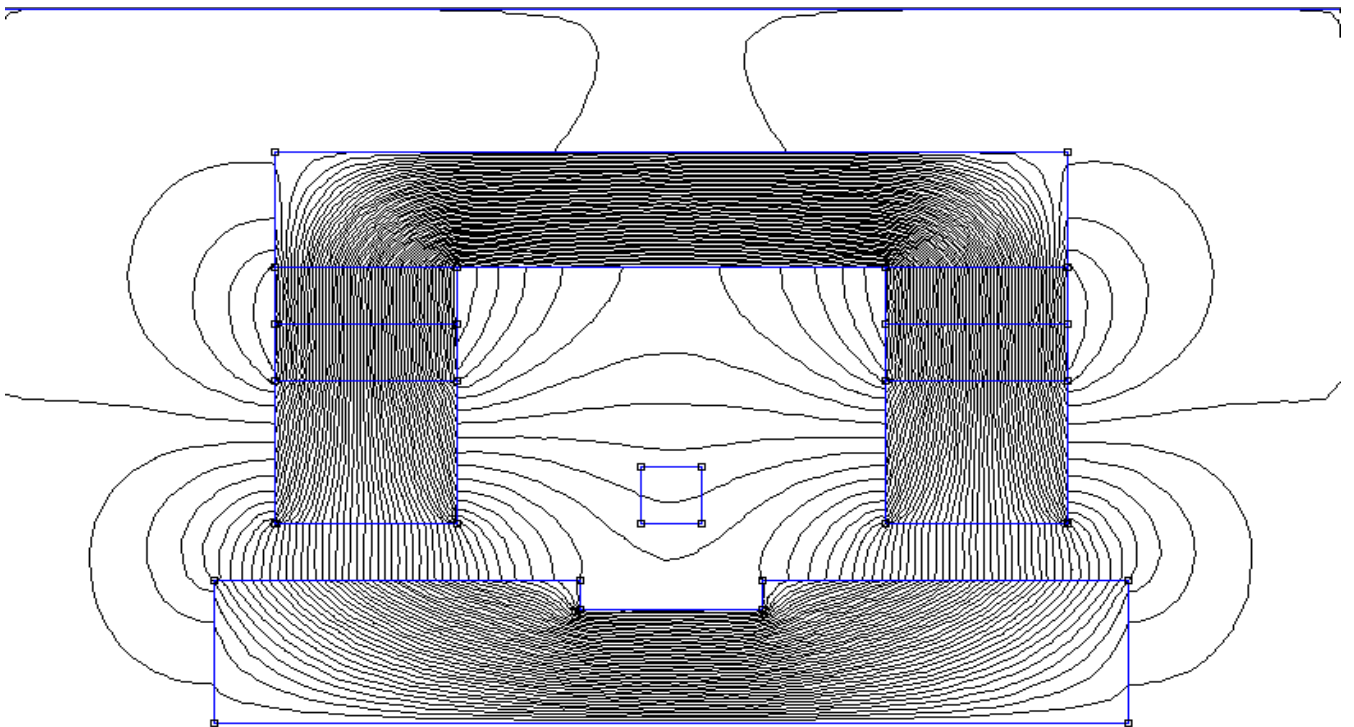


Figure III.27 La géométrie du dispositif présenté dans le cas non linéaire « Avec défaut »



**Figure III.28** Le maillage du domaine d'étude dans le cas non-linéaire « Avec défaut »



**Figure III.29** Les lignes de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut »

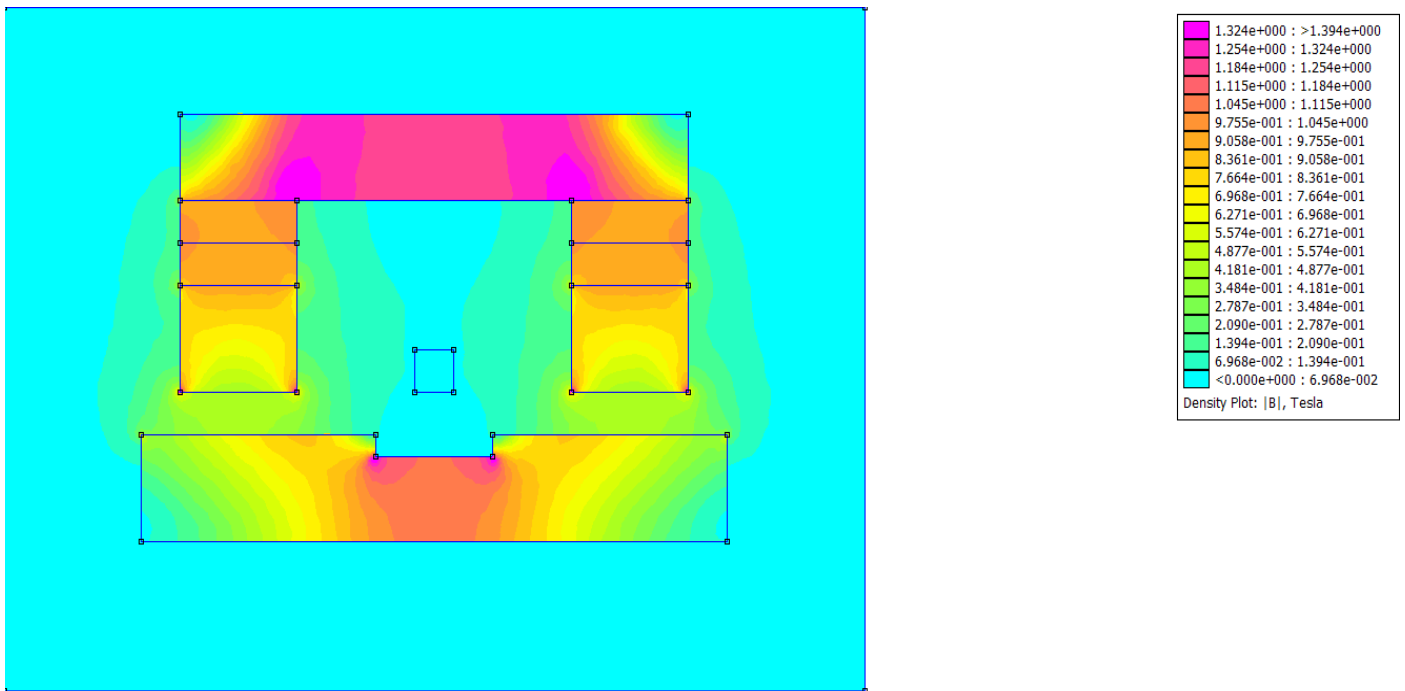


Figure III.30 La densité de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut »

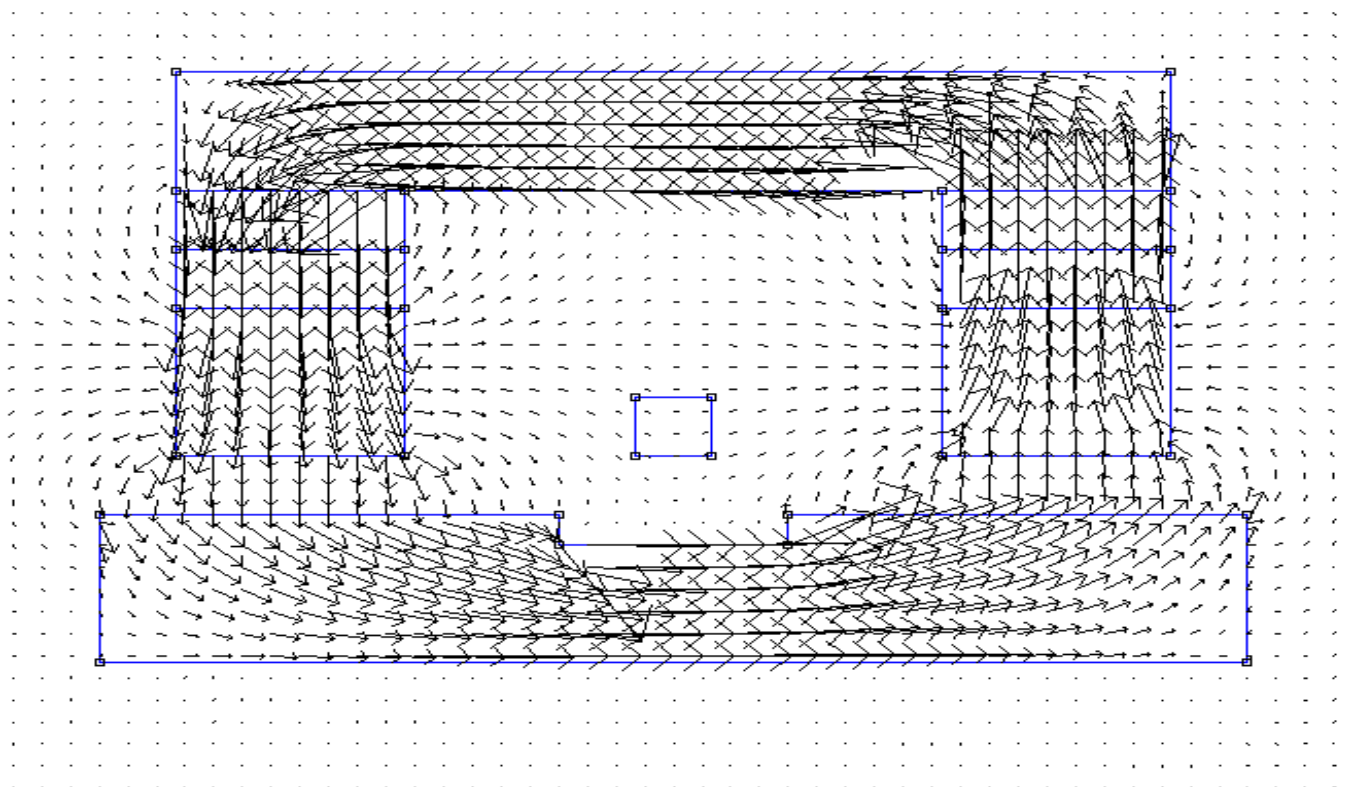


Figure III.31 les flèches de flux magnétique dans le cas non-linéaire « Avec défaut »

Energie magnétique totale dans la plaque d'acier = 0.0170 mJ

Densité de flux magnétique dans la plaque d'acier = 1.0765 T

### III.2.4.1.b).1 Interprétation des résultats

Dans cette simulation non linéaire avec défaut, où le matériau examiné est un acier avec une perméabilité relative variable, les résultats indiquent que le maillage du domaine est légèrement plus dense, avec 6972 nœuds et 13681 éléments, par rapport au cas sans défaut. La plaque d'acier présente une énergie magnétique totale de 0,0170 mJ, légèrement supérieure à celle du cas sans défaut, tandis que la densité de flux magnétique dans la plaque est considérablement plus élevée, atteignant 1,0765 T. Ces résultats indiquent que le champ magnétique de la plaque d'acier a été considérablement modifié en raison d'un défaut, ce qui peut être une indication d'une perturbation des propriétés magnétiques du matériau.

### III.2.4.2 Effet de variation des dimensions du défaut sur l'énergie magnétique et la densité de flux magnétique (non linéaire)

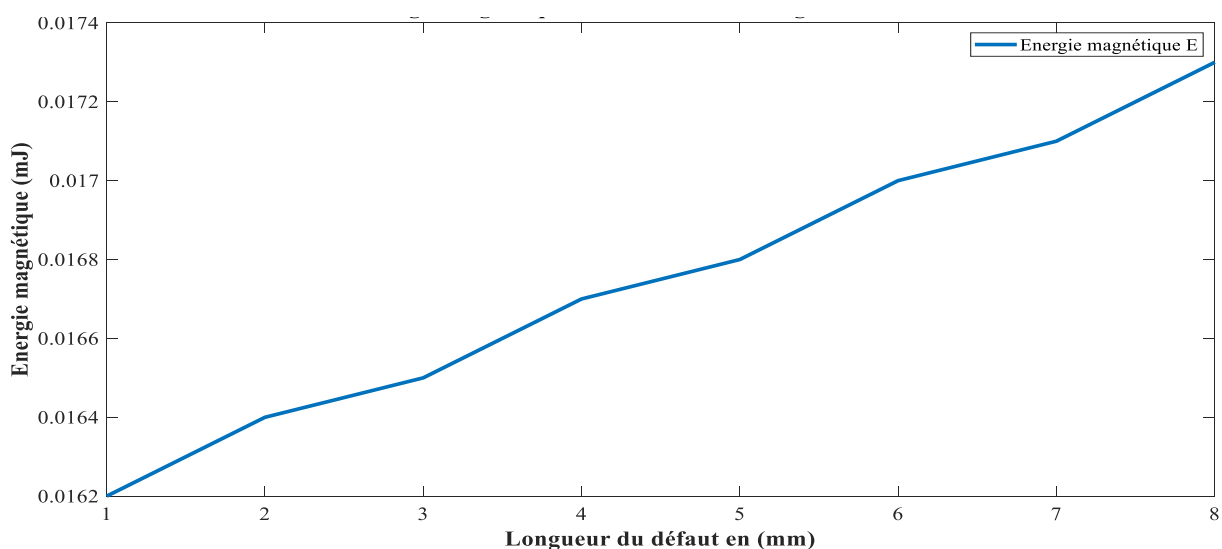
Cette fois-ci, nous allons étudier les variations des dimensions du défaut sur la densité de flux magnétique et sur l'énergie magnétique totale dans le cas non linéaire :

#### III.2.4.2.a) Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

Nous étudions l'effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et sur l'énergie magnétique totale. La longueur du défaut est variée de 1 mm à 8 mm, tandis que la profondeur est fixée à 1 mm.

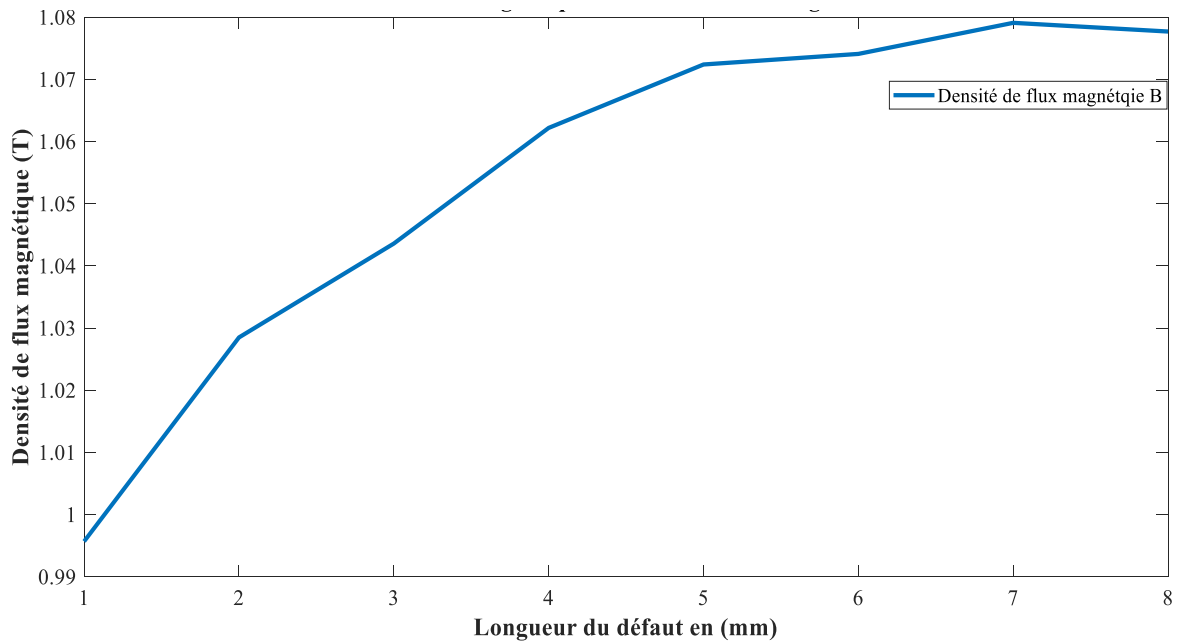
**Tableau III-7.** Effet de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

Longueur du fissure (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Energie magnétique (mJ)	0,0162	0,0164	0,0165	0,0167	0,0168	0,0170	0,0171	0,0173
Densité de flux magnétique (T)	0,9957	1,0285	1,0436	1,0622	1,0724	1,0741	1,0791	1,0777



**Figure III.32** La variation de l'énergie magnétique en fonction de la longueur du défaut





**Figure III.33** La variation de la densité de flux magnétique en fonction de la longueur du défaut

### III.2.4.2.a)1 Interprétation des résultats

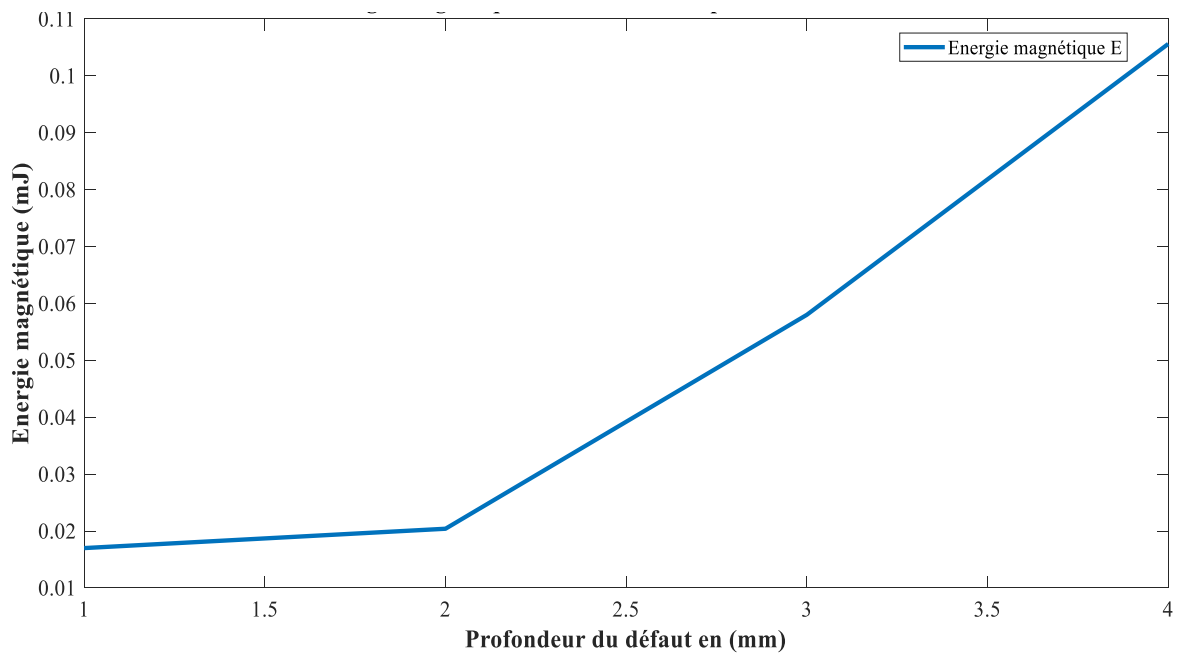
Dans cette étude, nous avons vu l'impact de la variation de la longueur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale dans le cas non linéaire. Les résultats indiquent que l'énergie magnétique augmente progressivement avec l'augmentation de la longueur du défaut, passant de 0,0162 mJ à 0,0173 mJ lorsque la longueur du défaut varie de 1 mm à 8 mm. De même, la variation de la densité de flux magnétique avec la longueur du défaut est également régulière, passant de 0,9957 T à 1,0777 T sur la même plage de variation de la longueur.

### III.2.4.2.b) Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale

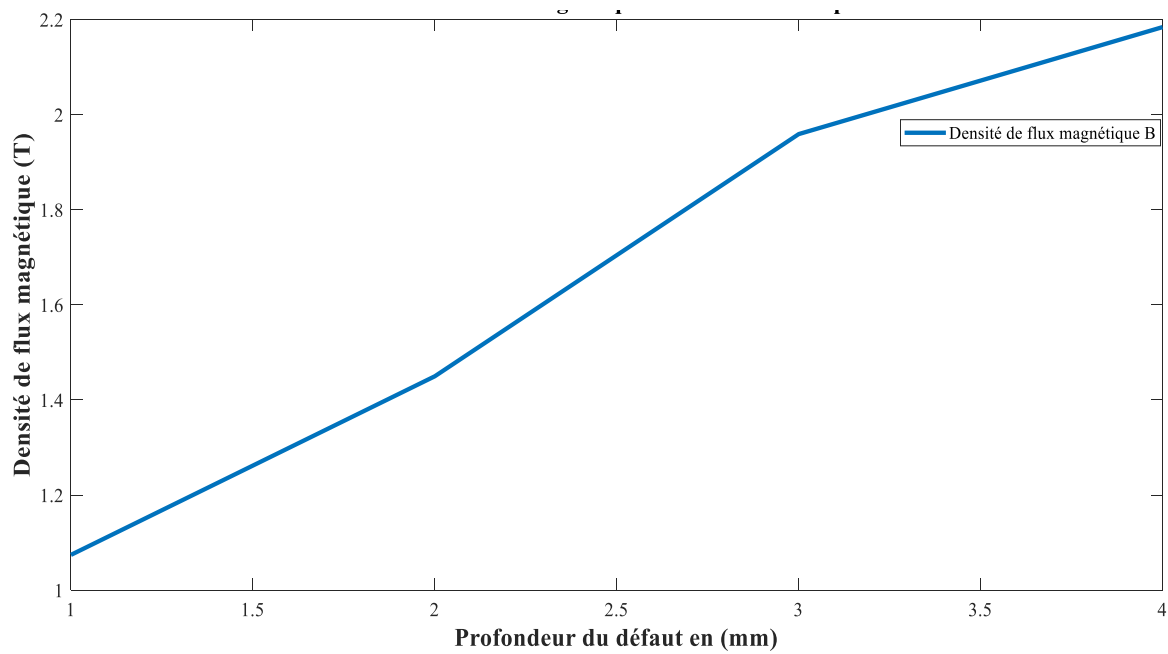
Cette fois-ci, nous allons faire varier la profondeur de défaut de 1 mm à 4 mm et on fixe la longueur à 6 mm.

**Tableau III-8.** Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la densité de flux magnétique et l'énergie magnétique totale.

Profondeur du fissure (mm)	1	2	3	4
Energie magnétique (mJ)	0.017	0.0204	0.0580	0.1056
Densité de flux magnétique (T)	1.0741	1.4497	1.9590	2.1840



**Figure III.34** La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur



**Figure III.35** La variation de l'énergie magnétique en fonction de la profondeur

### III.2.4.2.b).1 Interprétation des résultats

En ajustant la profondeur du défaut de 1 mm à 4 mm tout en maintenant la longueur à 6 mm, on observe une augmentation significative de l'énergie magnétique de 0,017 mJ à 0,1056 mJ et une augmentation de la densité de flux magnétique de 1,0741 T à 2,1840 T, ce qui témoigne d'une augmentation significative de l'intensité du champ magnétique avec la profondeur du défaut.

### III.2.5 Interprétation des résultats donnée par femm

Les résultats indiquent que les deux cas linéaire et non linéaire présentent des disparités importantes dans la relation entre le champ magnétique (H) et la densité de flux magnétique (B). Dans un régime linéaire, on considère que les caractéristiques magnétiques d'acier sont constantes et proportionnelles à la force magnétique exercée. Cela rend les calculs plus simples et facilite les solutions analytiques directes. Par contre, dans une configuration non linéaire, les caractéristiques magnétiques du matériau diffèrent selon le champ magnétique appliqué, ce qui demande une résolution numérique plus complexe. Cette approche est essentielle pour capturer les défauts avec précision sur les effets de saturation magnétique et les non-linéarités du matériau, offrant ainsi une modélisation plus réaliste des phénomènes magnétiques dans la plaque à inspecter.

## III.3 Simulation 3D : (En utilisant COMSOL multiphysics)

### III.3.1 Etapes de simulation

Dans COMSOL Multiphysics, la simulation d'un modèle 3D de détection de fissures par flux de fuite magnétique nécessite plusieurs étapes spécifiques à la physique des champs magnétiques et à la détection des fissures. Voici un manuel détaillé pour réaliser une telle simulation :

#### III.3.1.1 Ouvrir COMSOL Multiphysics

- Lancez COMSOL Multiphysics sur votre ordinateur.

#### III.3.1.2 Créer un nouveau modèle

- Cliquez sur "Fichier" > "Nouveau" > "Modèle" pour créer un nouveau modèle de simulation.

#### III.3.1.3 Sélectionner Physiques Interfaces

- Dans la fenêtre "Model Builder", choisissez les interfaces physiques pertinentes pour votre modèle de détection de fissures par flux de fuite magnétique. Typiquement, cela implique de sélectionner les "Champs Magnétiques, Aucun Courant"

### **III.3.1.4 Définir la géométrie en 3D**

- Créez ou importez la géométrie 3D qui représente l'objet fissuré que vous souhaitez analyser. S'assurer que la géométrie comprend l'emplacement de la fissure, les dimensions et les matériaux environnants.

### **III.3.1.5 Configurer les propriétés du matériau**

- Spécifiez les propriétés du matériau pour différentes régions de votre géométrie. Définissez la conductivité électrique et la perméabilité relative des matériaux impliqués, en particulier le matériau ferromagnétique (par exemple, un métal) et le matériau non ferromagnétique (par exemple, l'air ou un solide non métallique).

### **III.3.1.6 Définir les conditions aux limites**

- Définissez les conditions aux limites pour représenter le domaine d'étude et le comportement des champs magnétiques aux limites. Spécifiez des conditions telles que le champ magnétique de l'aimant soit nul dans les limites (frontière).

### **III.3.1.7 Définir les paramètres du maillage**

- Générez un maillage adapté à votre géométrie 3D. Les paramètres de maillage doivent être affinés près de la zone de fissure pour capturer les détails du flux magnétique avec précision.

### **III.3.1.8 Définir les équations du champ magnétique**

- Configurez les équations régissant le flux magnétique. Dans COMSOL, cela implique généralement de définir les équations de champ magnétique et d'incorporer des termes qui tiennent compte des flux magnétiques induits par les aimants.

### **III.3.1.9 Configurer l'étude**

- Définissez le type d'étude que vous souhaitez effectuer. Selon vos objectifs, vous pouvez choisir un domaine de fréquence, un domaine temporel ou un examen paramétrique.

### **III.3.1.10 Spécifier les paramètres du solveur**

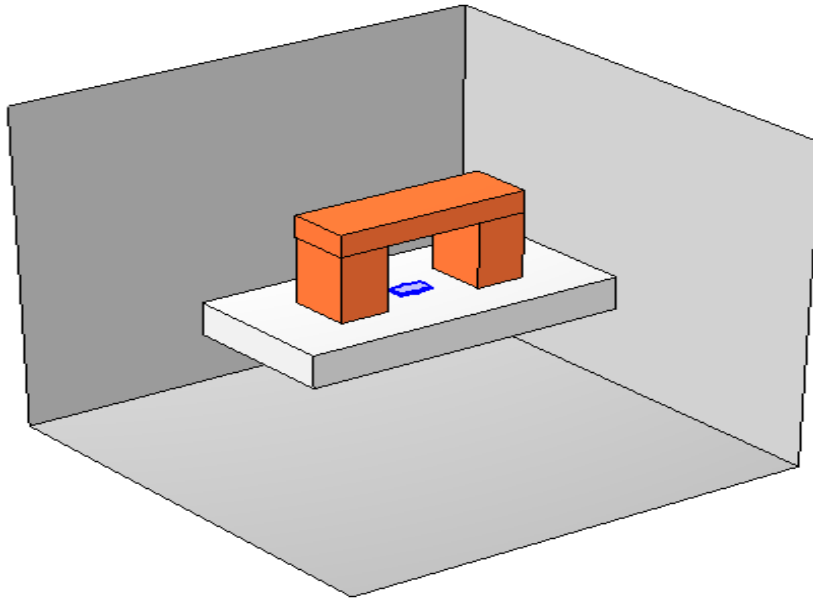
- Configurez les paramètres du solveur, tels que le type de solveur, les critères de convergence et les paramètres temporels si vous effectuez des simulations transitoires.

### **III.3.1.11 Lancer la simulation**

- Cliquez sur le bouton Exécuter pour démarrer la simulation. COMSOL résoudra les équations de champ magnétique et calculera la distribution de flux magnétiques dans l'objet 3D.

### III.3.2 Simulation

Tout d'abord, nous commençons par dessiner la géométrie de l'aimant permanent, la plaque de fer, et le défaut. Ensuite, spécifiez les propriétés des matériaux utilisés (les aimants sont réglés pour être d'un matériau en néodyme-fer-bore (NdFeB) et la plaque d'un matériau en fer) et les limites des matériaux existants, comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure III.36** La géométrie du dispositif étudié avec COMSOL

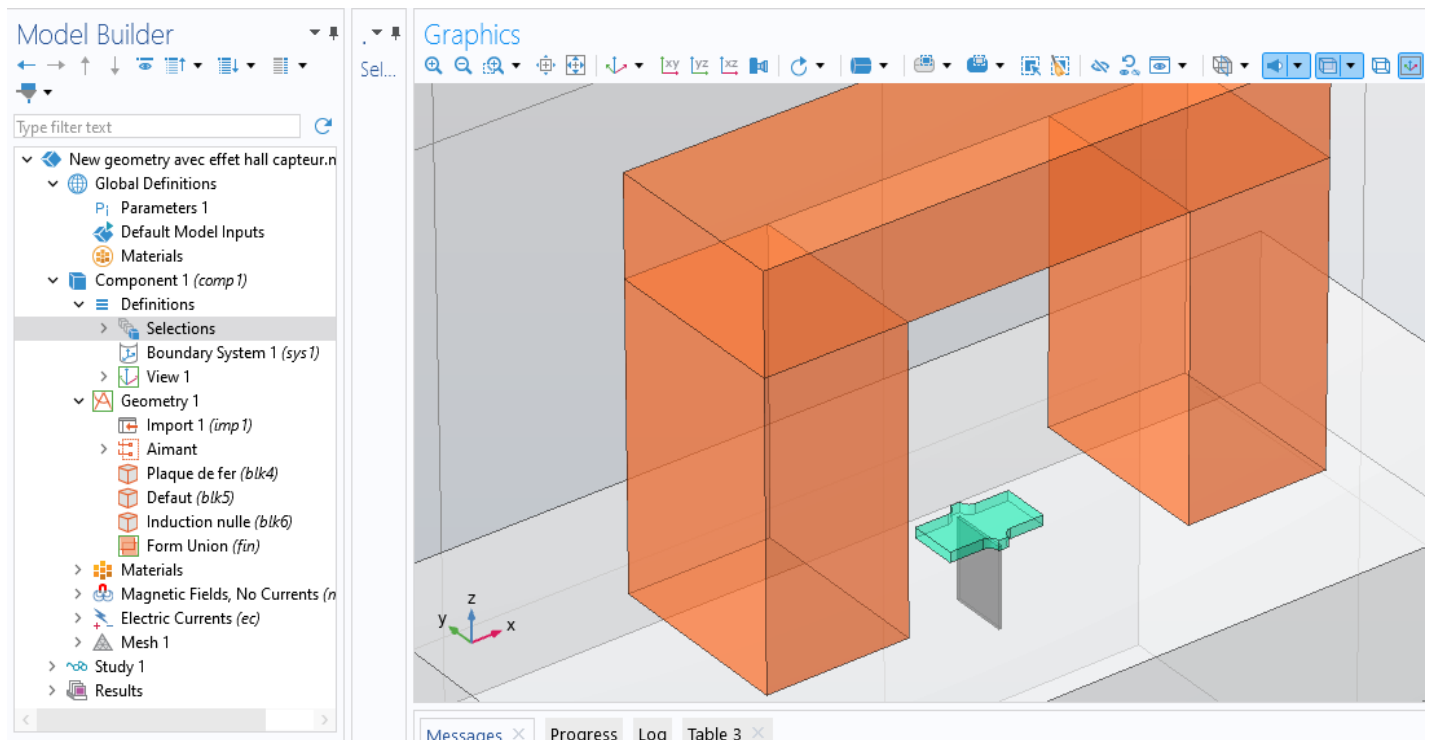
#### III.3.2.1 Dimensions du dispositif étudié

**Tableau III-9.** Les Dimensions du dispositif étudié par COMSOL

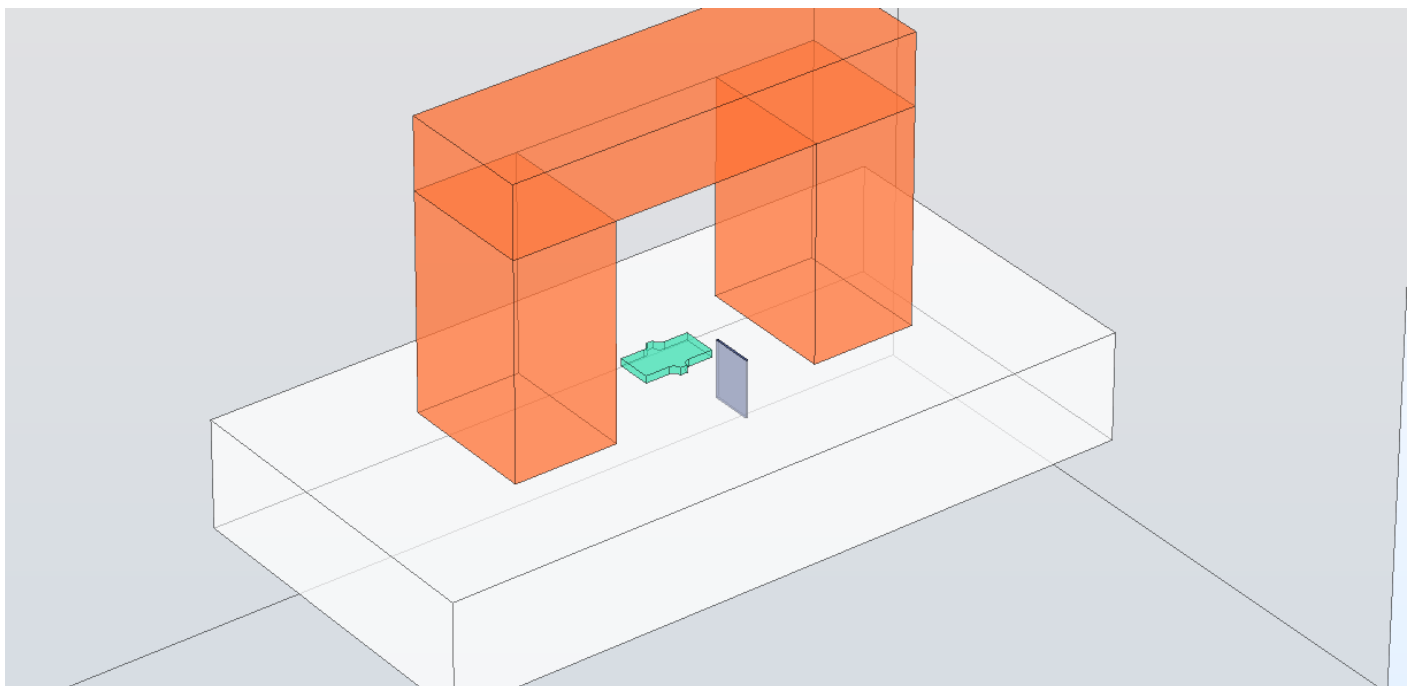
	Largeur	Profondeur	Hauteur
Aimants (mm)	15	20	30
Plaque à inspecter (mm)	100	50	15
Circuit magnétique (mm)	60	20	10

### III.3.2.2 Paramètres d'entrée

Les paramètres de la géométrie et des propriétés des matériaux ont été définis selon nos préférences, comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure III.37** Affichage des Paramètres d'entrée du dispositif étudié avec COMSOL



**Figure III.38** Affichage des Paramètres d'entrée du dispositif étudié (en mode plein écran)

- Les aimants : néodyme-fer-bore (NdFeB), conductivité électrique =  $7.1429 \cdot 10^5$  [S/m]
- Plaque de fer : Iron (fer), perméabilité relative = 4000
- Le capteur : à effet Hall (Semi-Conducteur), conductivité électrique = 1040 [S/m]

Permittivité relative = 12

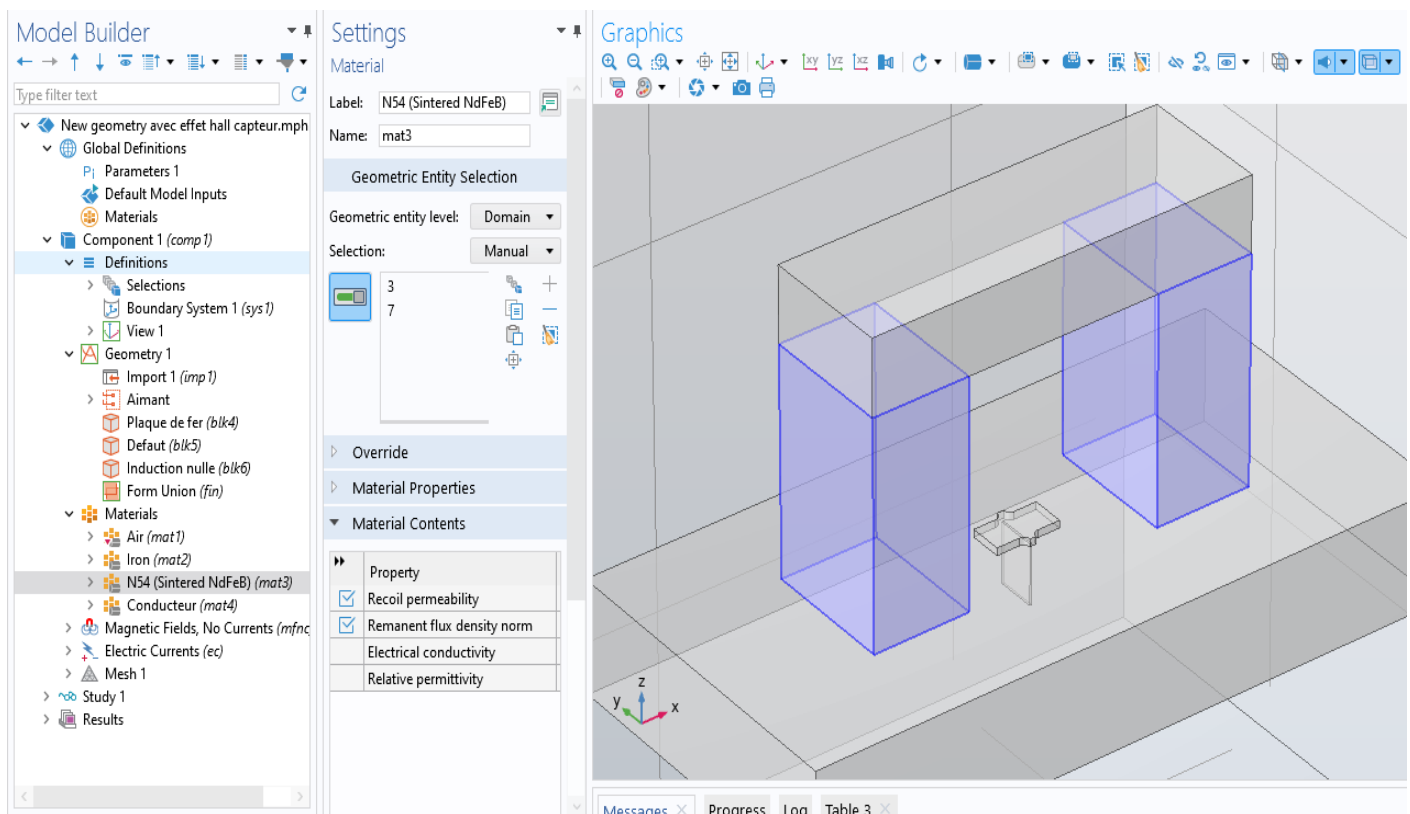
- Paramètres du défaut :

Longueur : 6 [mm]

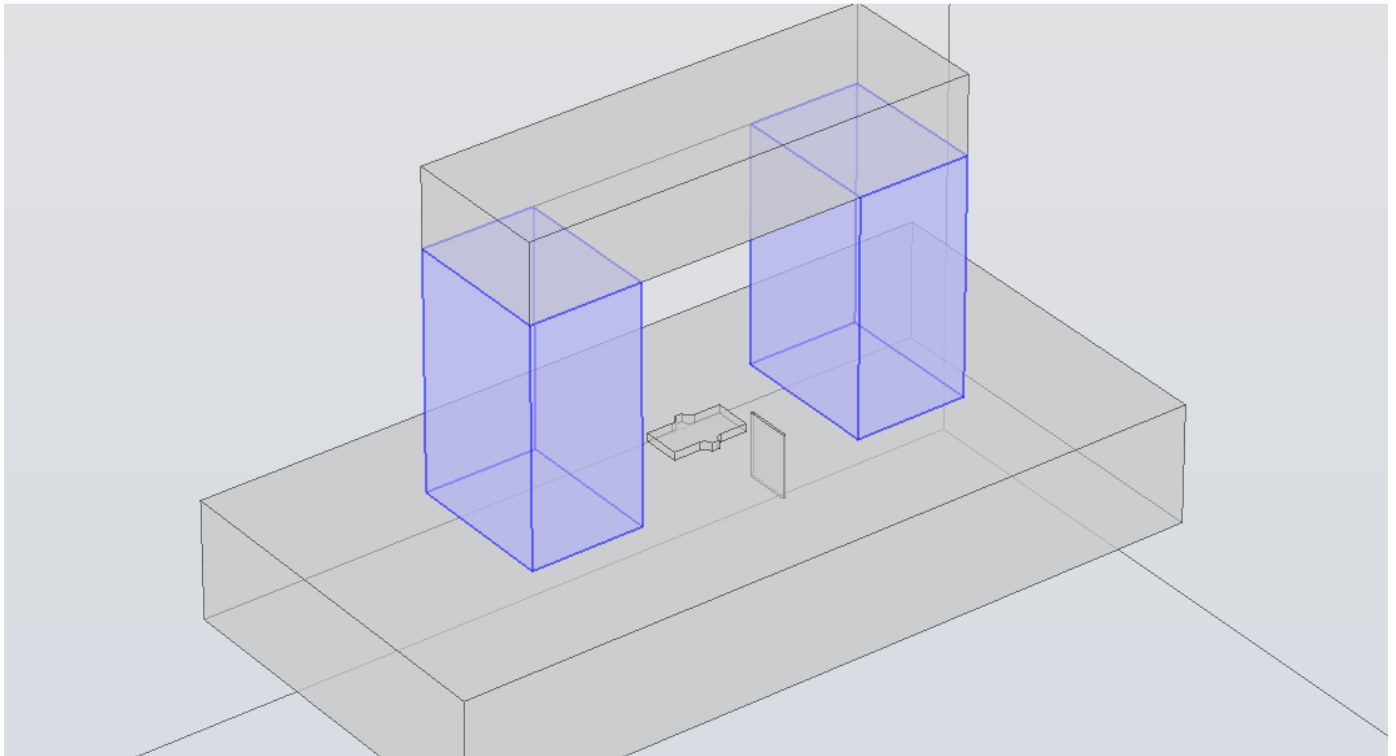
Epaisseur : 0.3 [mm]

Largeur : 8 [mm]

Lift-off : 0.5 [mm]



**Figure III.39** Affichage des matériaux utilisés dans notre dispositif par COMSOL



**Figure III.40** Affichage des matériaux utilisés dans notre dispositif (en plein écran)

### III.3.2.3 Configuration du dispositif étudié

Puisque notre étude est la détection des défauts par flux de fuite magnétique est purement un problème magnétique, nous avons utilisé les équations de Maxwell pour le résoudre.

- Étude dans un état stationnaire.
- Le défaut est modélisé en lui attribuant les propriétés matérielles de l'air.
- Conductivité non nulle au domaine de l'air pour la stabilisation numérique

La figure suivante montre les conditions aux limites du domaine de notre dispositif :



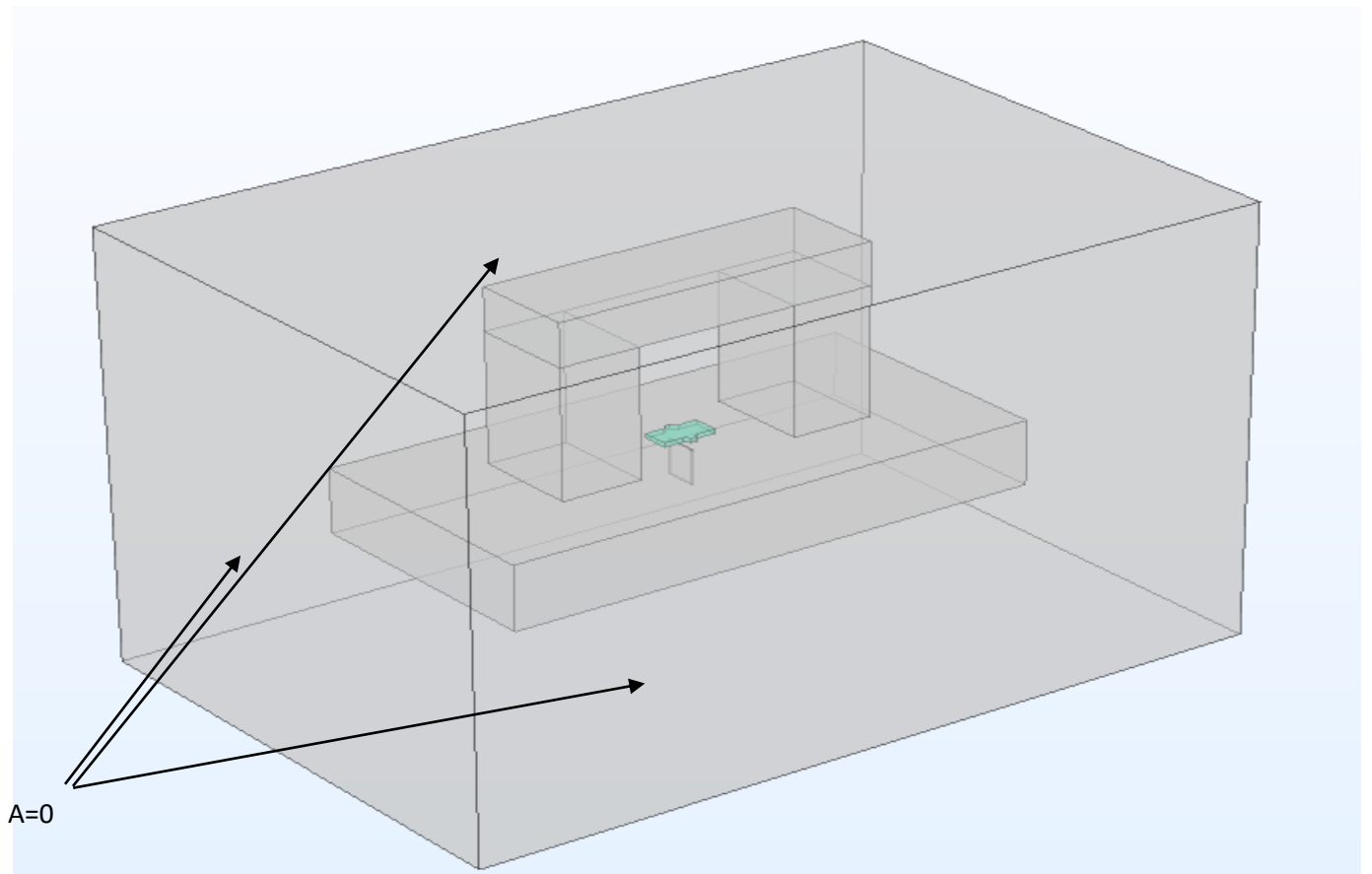


Figure III.41 Les limites du domaine étudié (Conditions aux limites)

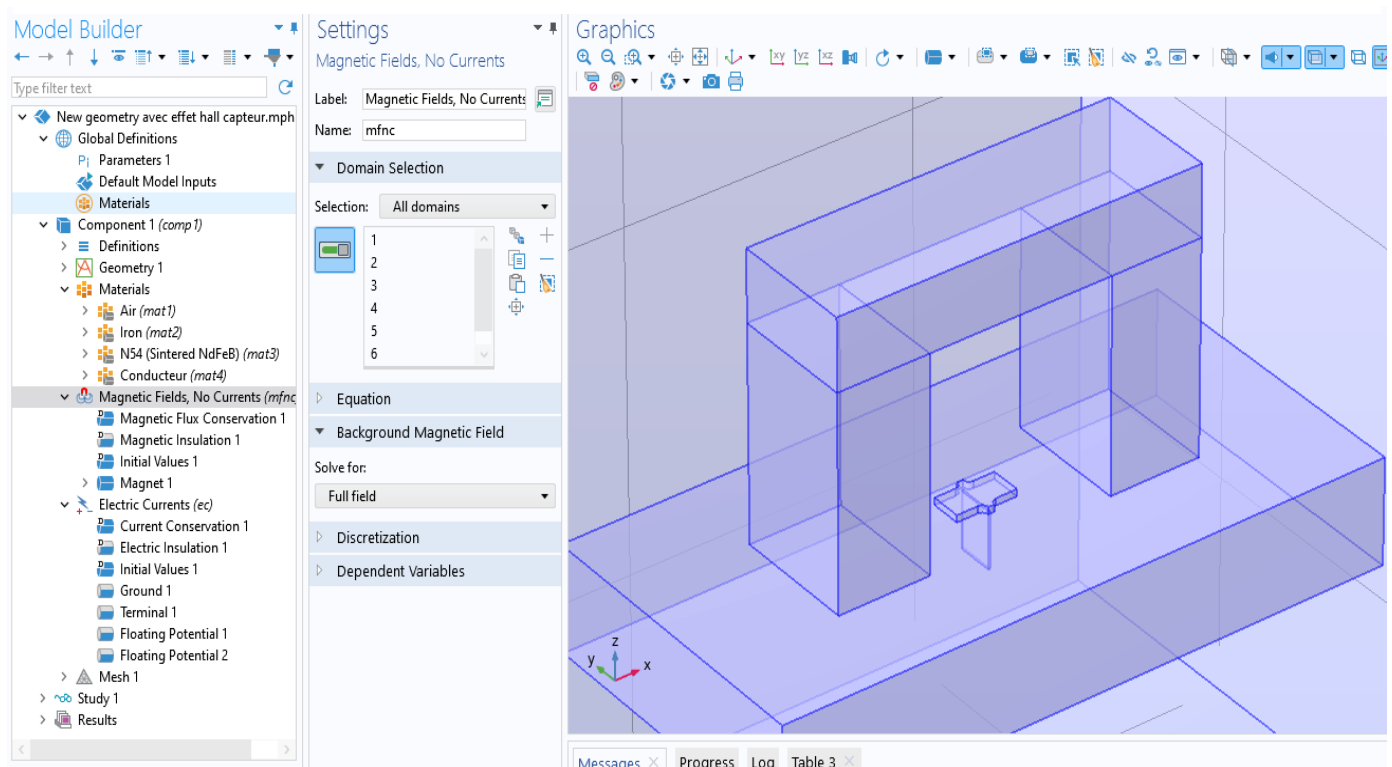


Figure III.42 Affichage des interfaces physiques utilisées dans notre dispositif sur COMSOL

### III.3.2.4 Réglage des paramètres de l'aimant

Comme établi précédemment, l'aimant permanent est fait de N54 (NdFeb). Nous devons spécifier les limites nord et sud de l'aimant pour la circulation du champ magnétique.

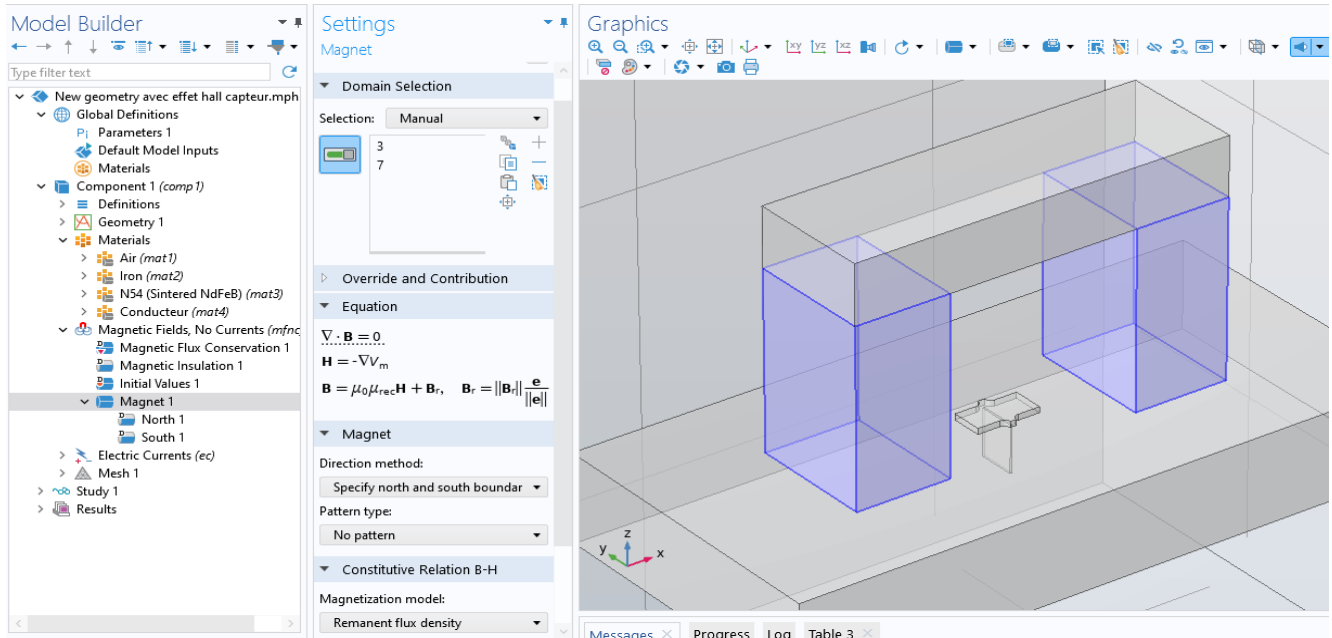


Figure III.43 Affichage des paramètres du nord et du sud de nos aimants utilisés sur COMSOL

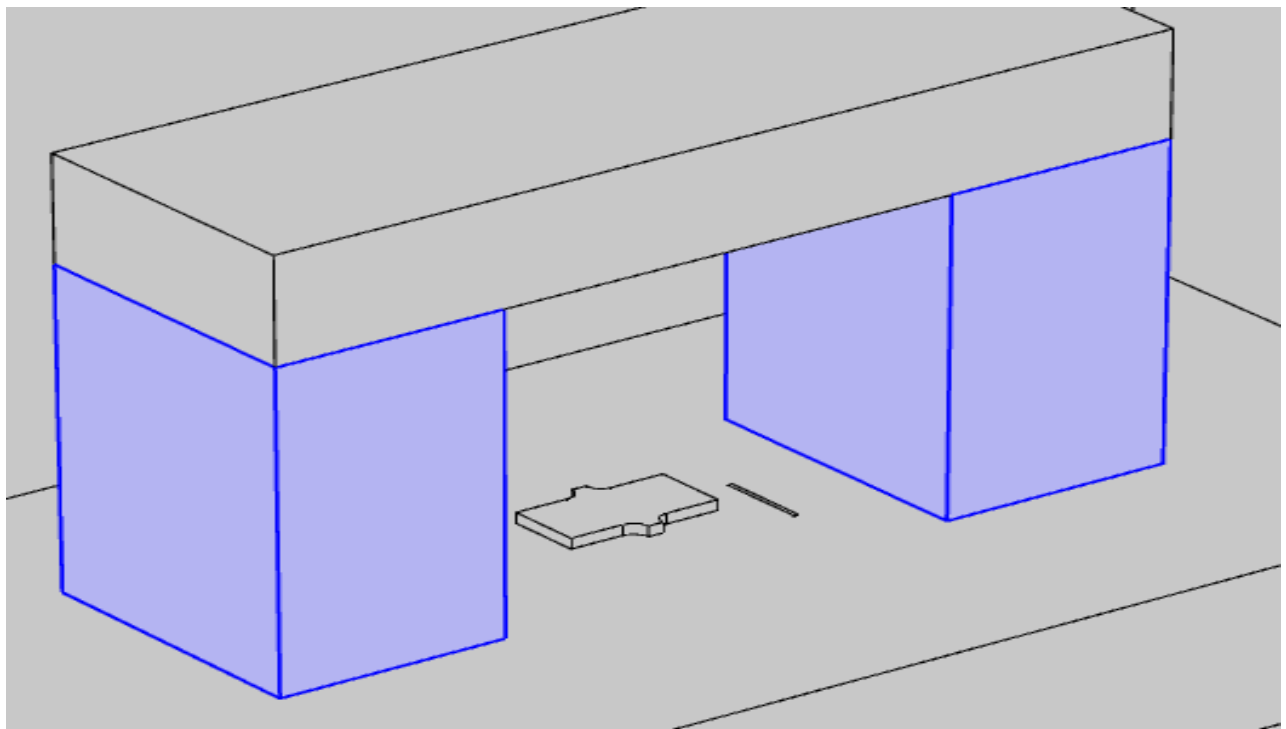


Figure III.44 Affichage du domaine des aimants utilisés (en plein écran)

### III.3.2.5 Réglage des paramètres du capteur

Le capteur utilisé dans notre dispositif est le capteur à effet Hall, elle est utilisée pour capter la présence du champ magnétique dans la plaque à inspecter.

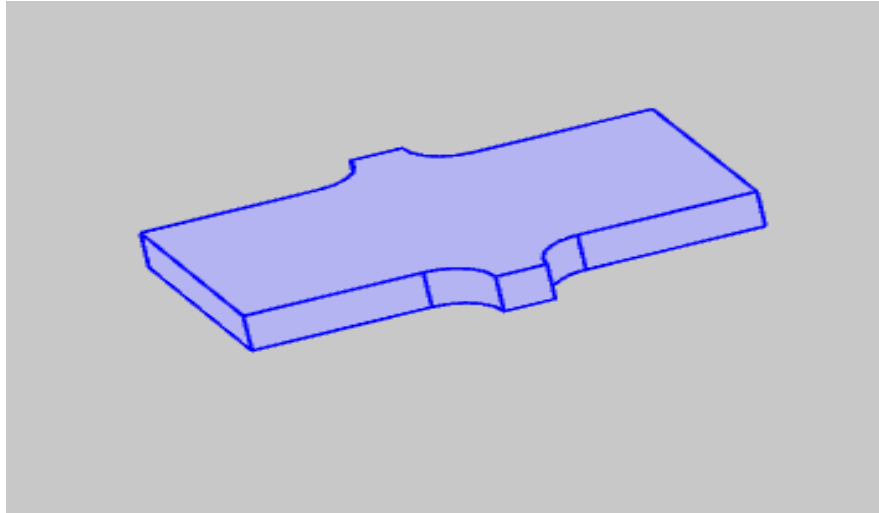


Figure III.45 La géométrie du capteur utilisé

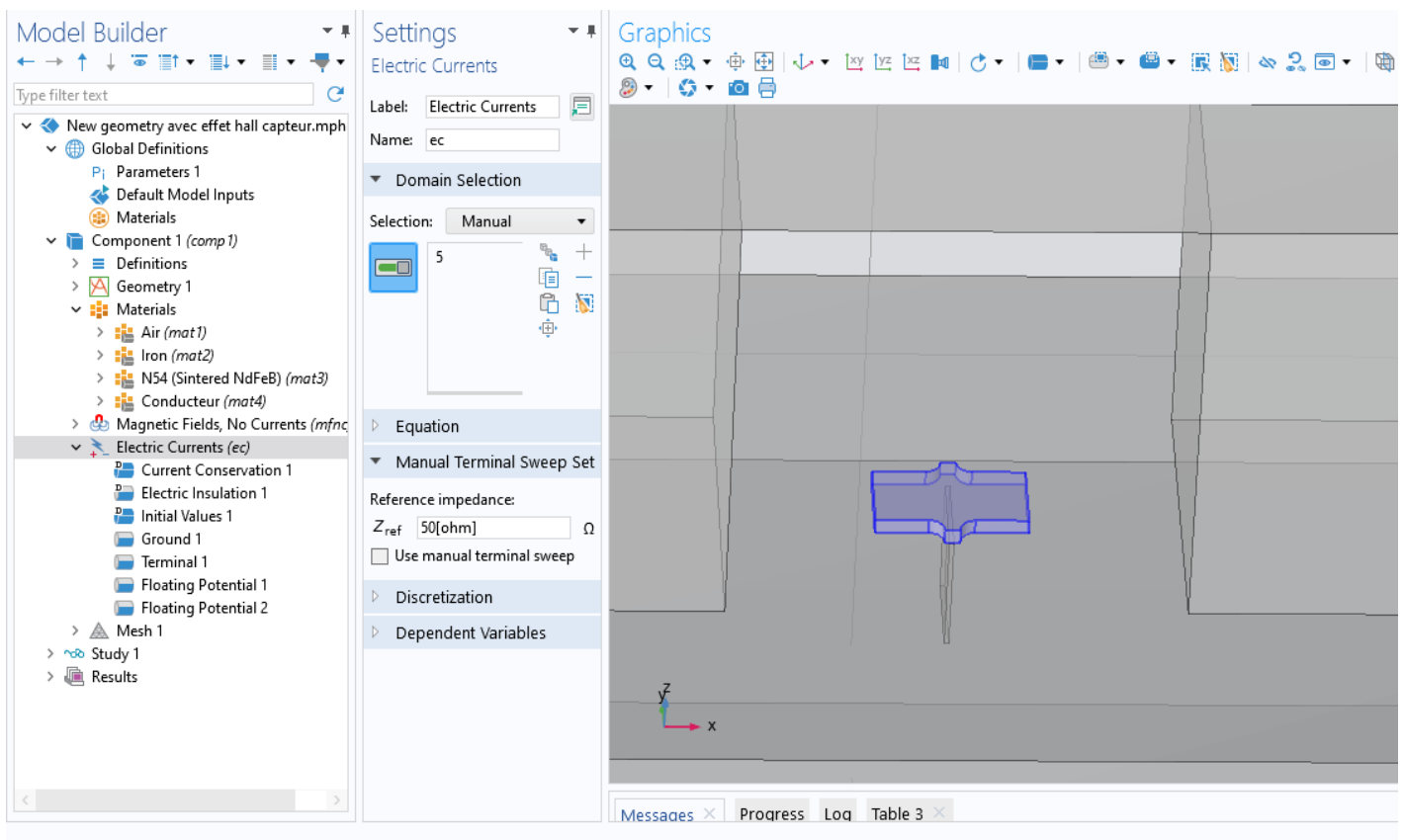


Figure III.46 Affichage de l'interface physique utilisée pour le capteur sur COMSOL

### III.3.2.6 Configuration d'étude

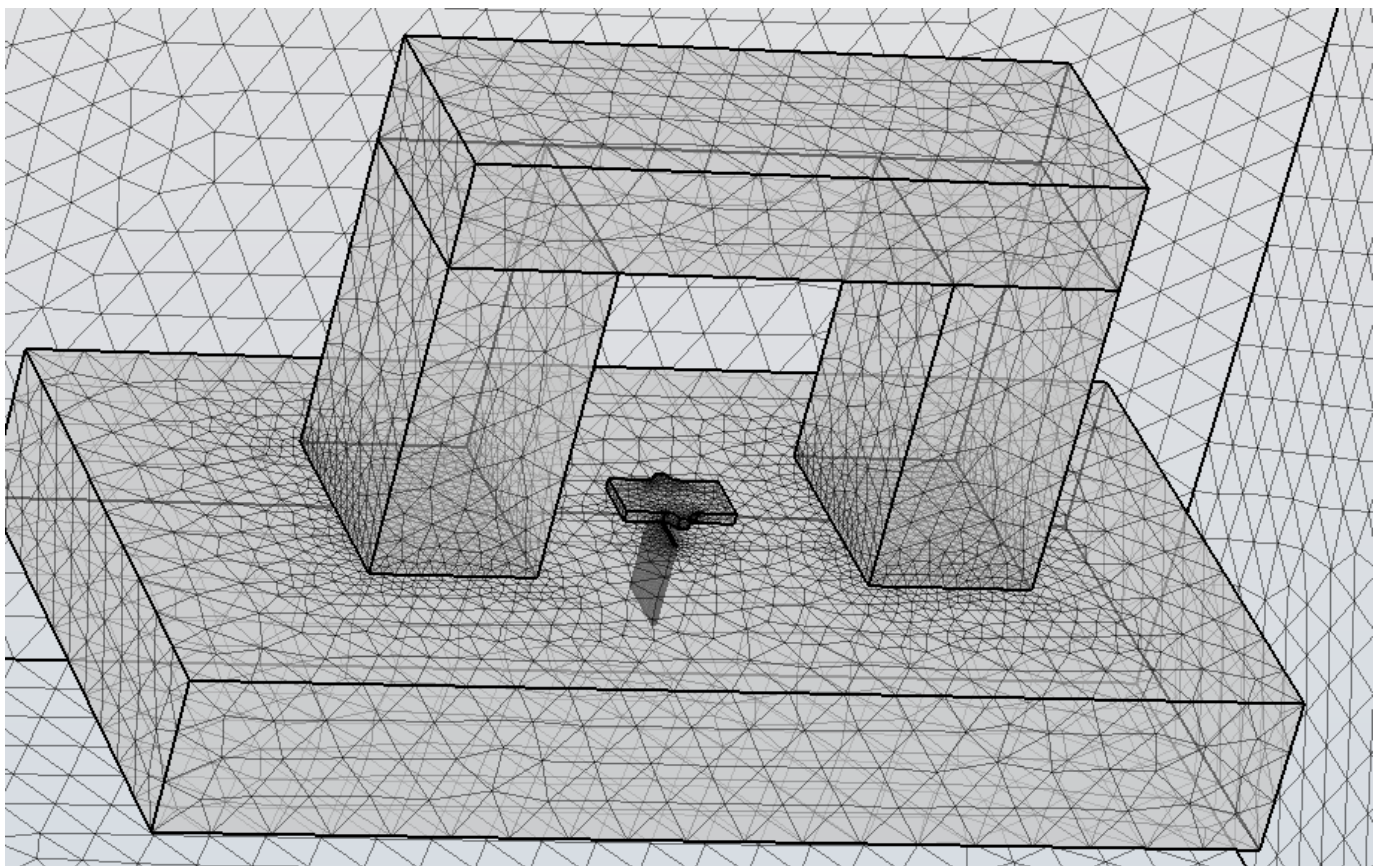
Nous avons deux cas d'étude « sans défaut » et « avec défaut » :

- Sans défaut : La pièce défectueuse prend les propriétés matérielles de la plaque de fer.
- Avec défaut : La pièce défectueuse prend les propriétés de l'air.
- Dans le cas d'un défaut, on va essayer de déplacer la position du défaut de 20 mm sur la longueur de la plaque (la distance entre les deux aimants).

La partie défectueuse prend les propriétés matérielles de l'air.

### III.3.3 Résultats de simulation

Le maillage du domaine d'étude est illustré par la figure suivante (III.47).



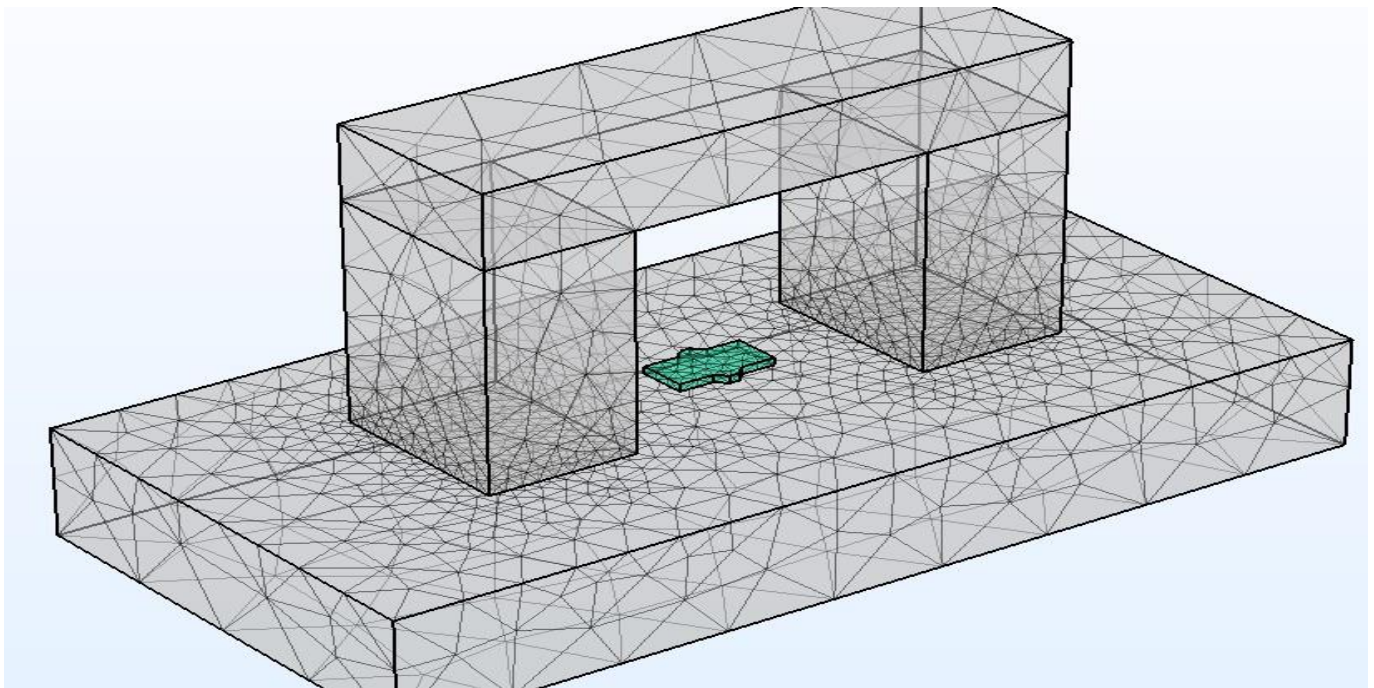
**Figure III.47** Affichage du maillage du domaine étudié

## Sorties du maillage

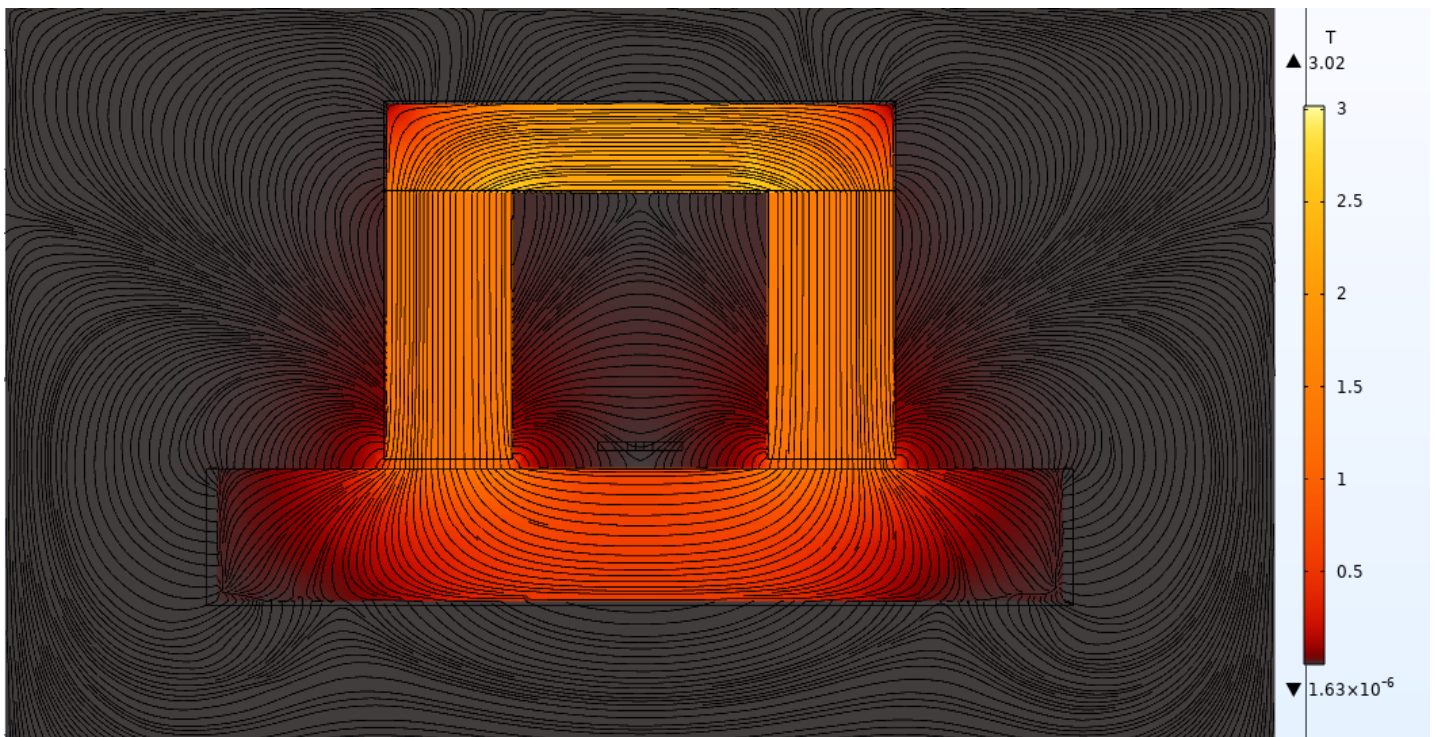
**Tableau III-10.** Les sorties du maillage donnée par COMSOL

Description	Value
État	Maille complète
Sommets de maille	21947
Tétraèdres	124643
Triangles	8418
Éléments de bordure	644
Éléments du sommet	68
Nombre d'éléments	124643
Qualité minimale de l'élément	0.1759
Qualité moyenne des éléments	0.6568
Rapport de volume de l'élément	3.81 e-5
Volume de maille	3375000.0 mm <sup>3</sup>

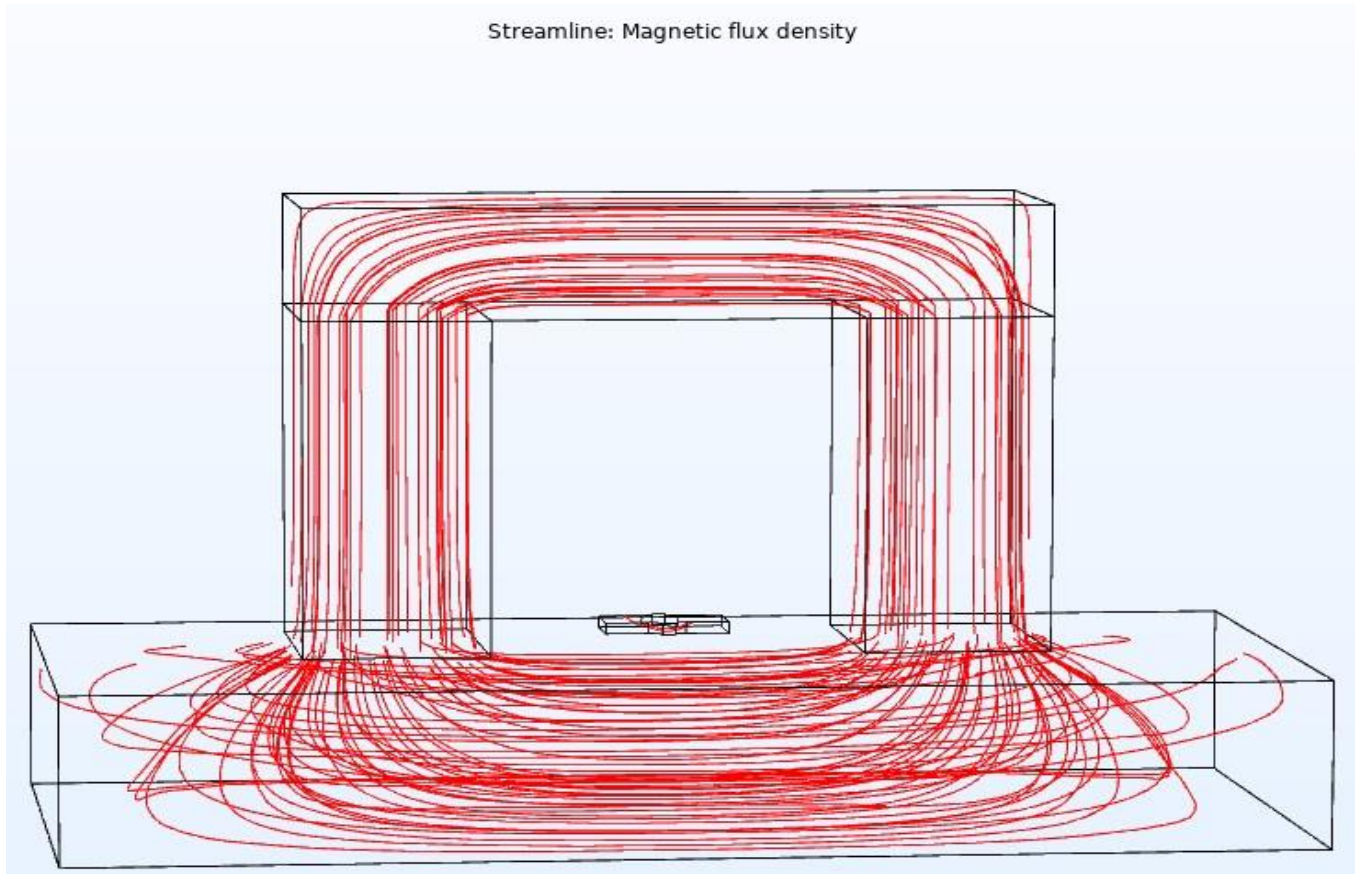
### III.3.3.1 Cas sans défaut



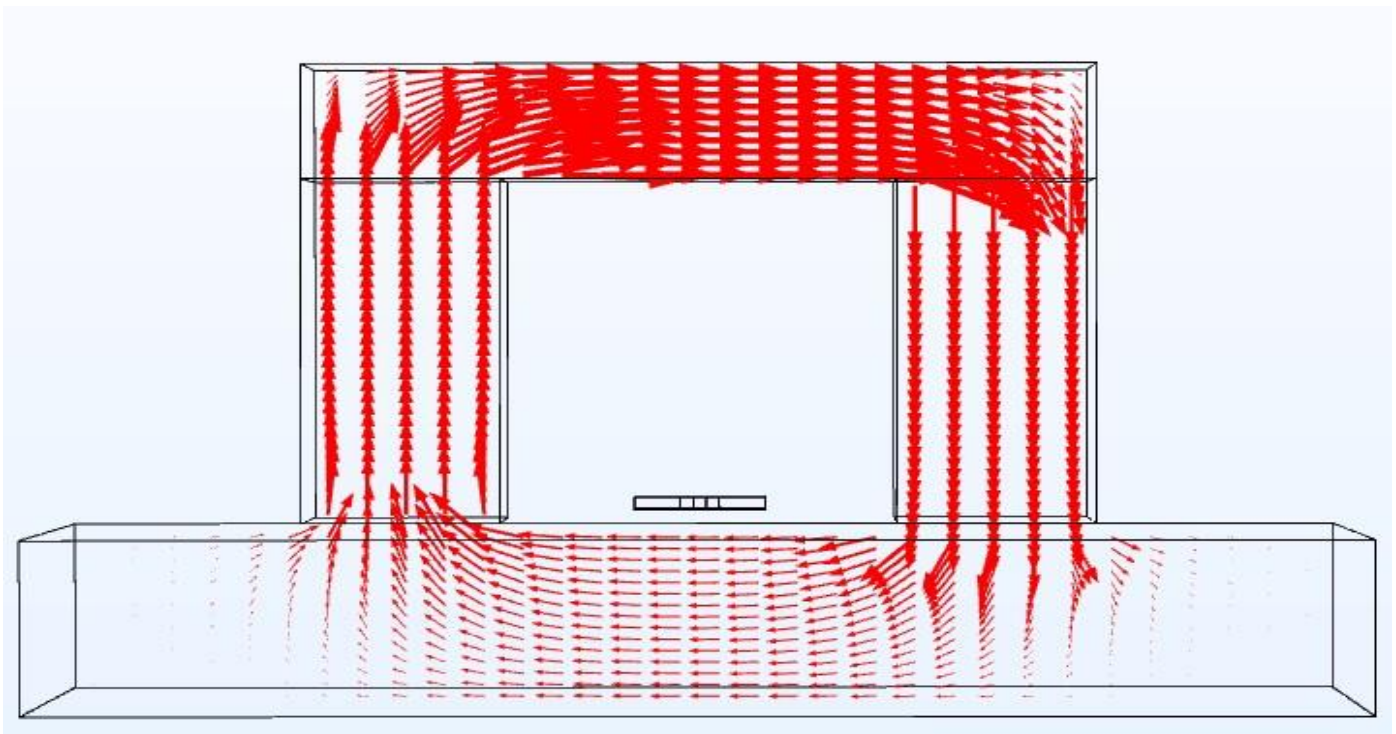
**Figure III.48** Affichage du maillage du dispositif étudié dans le cas « Sans défaut »



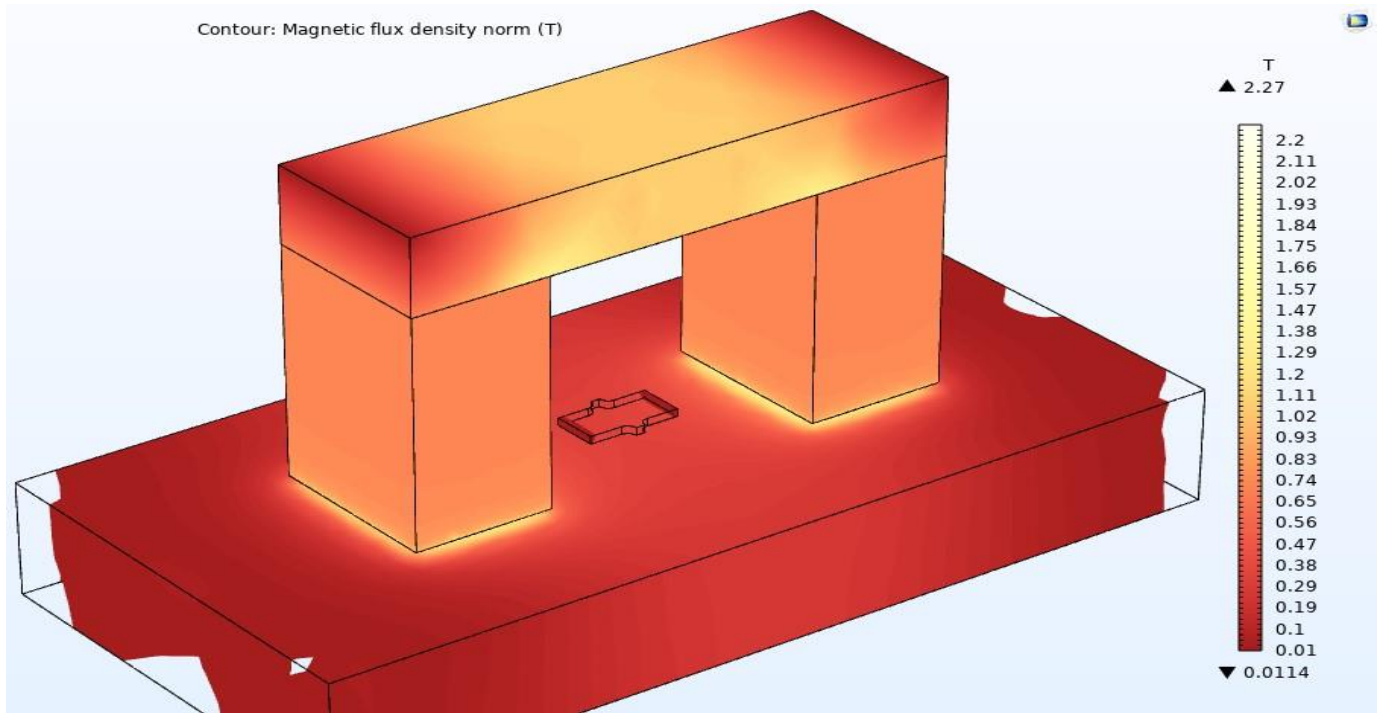
**Figure III.49** Affichage des lignes de flux magnétique dans le cas « Sans défaut »



**Figure III.50** Affichage des lignes de flux magnétique en 3D dans le cas « Sans défaut »



**Figure III.51** Affichage des flèches de flux magnétique dans le cas « Sans défaut »



**Figure III.52** Affichage de la densité de flux magnétique dans le cas « Sans défaut »

Le maillage (figure III.48) et les lignes (figure III.49) et les flèches (figure III.51) représentent la densité de flux magnétique  $B$  et son interaction avec l'échantillon dans le cas sans défaut.



### III.3.3.2 Cas avec défaut

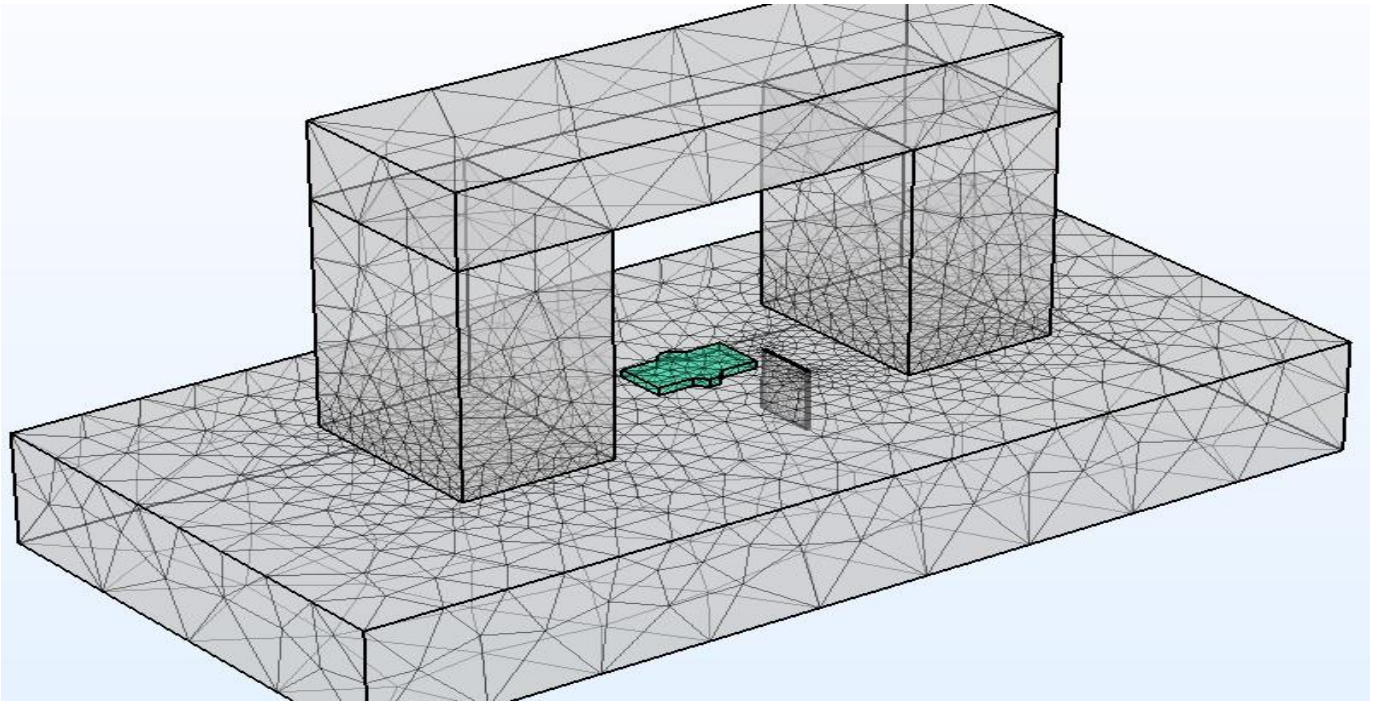


Figure III.53 Affichage de maillage du dispositif étudié dans le cas « Avec défaut »

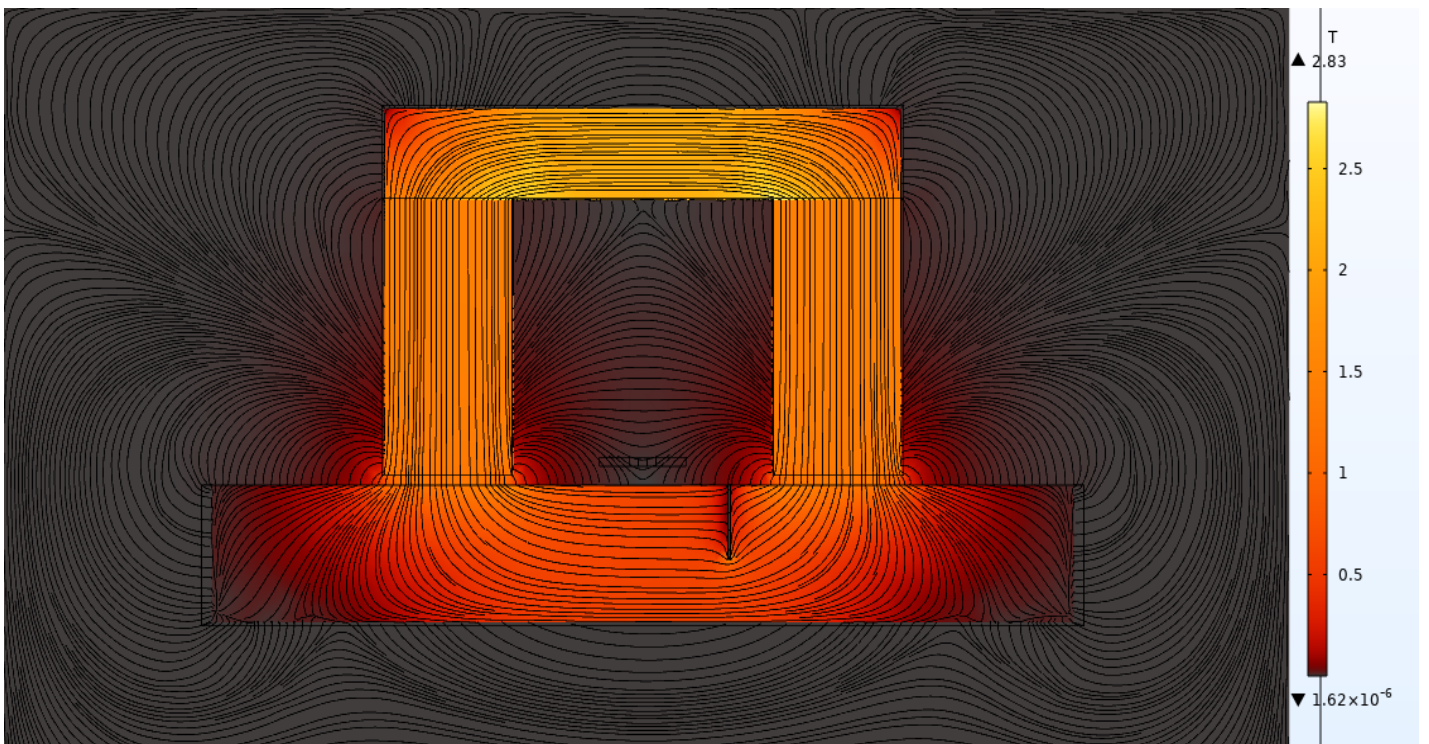
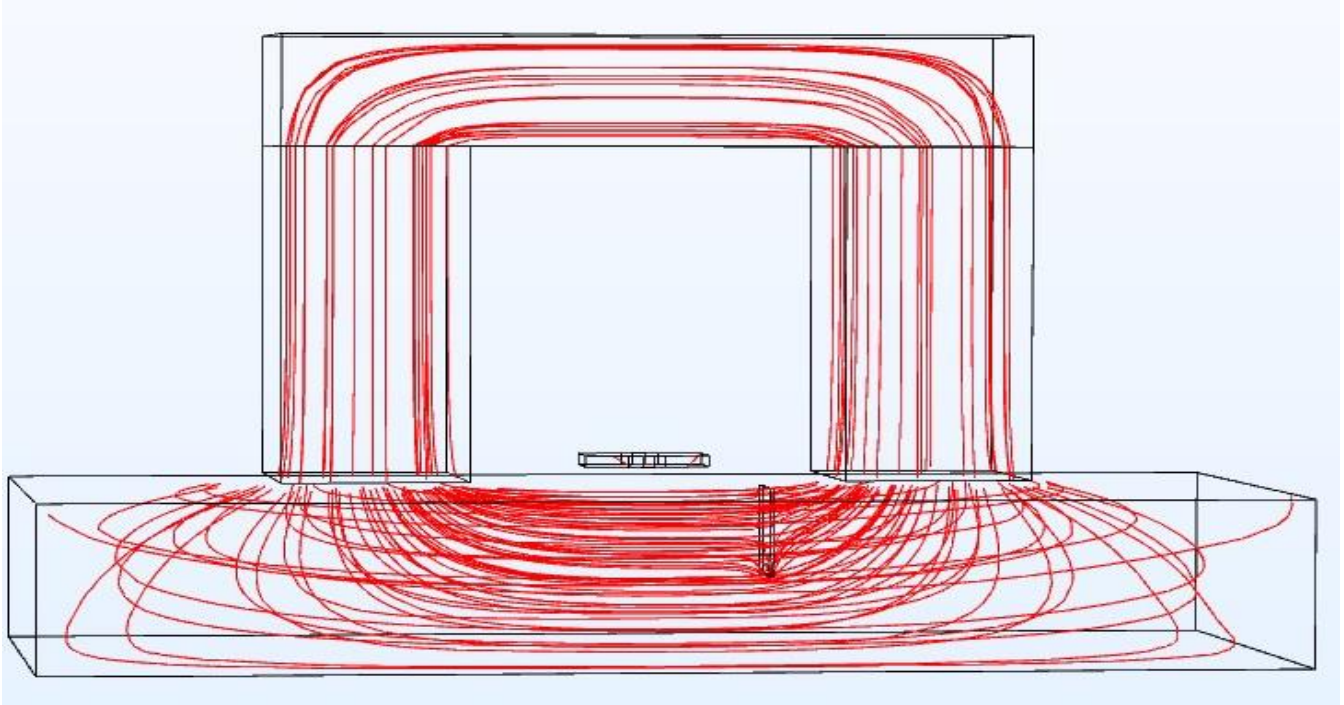
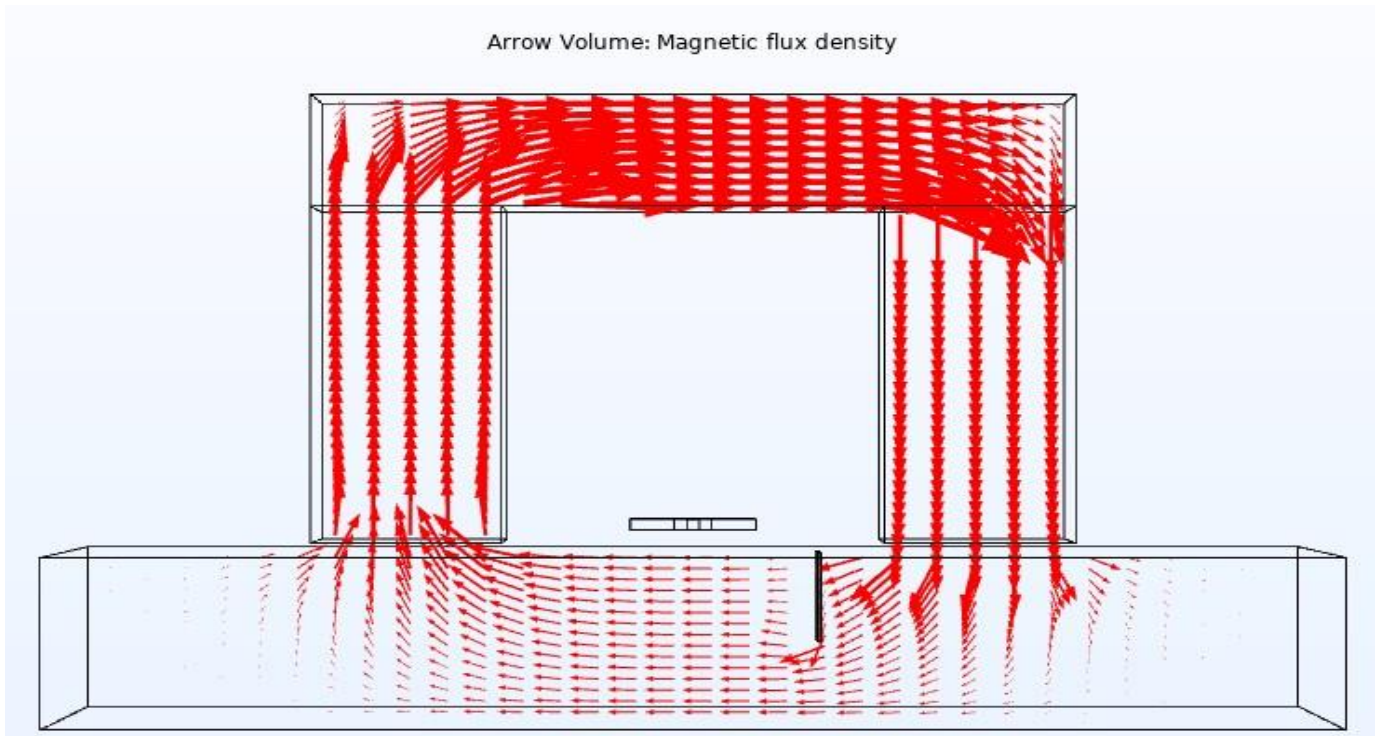


Figure III.54 Affichage des lignes de flux magnétique dans le cas « Avec défaut »



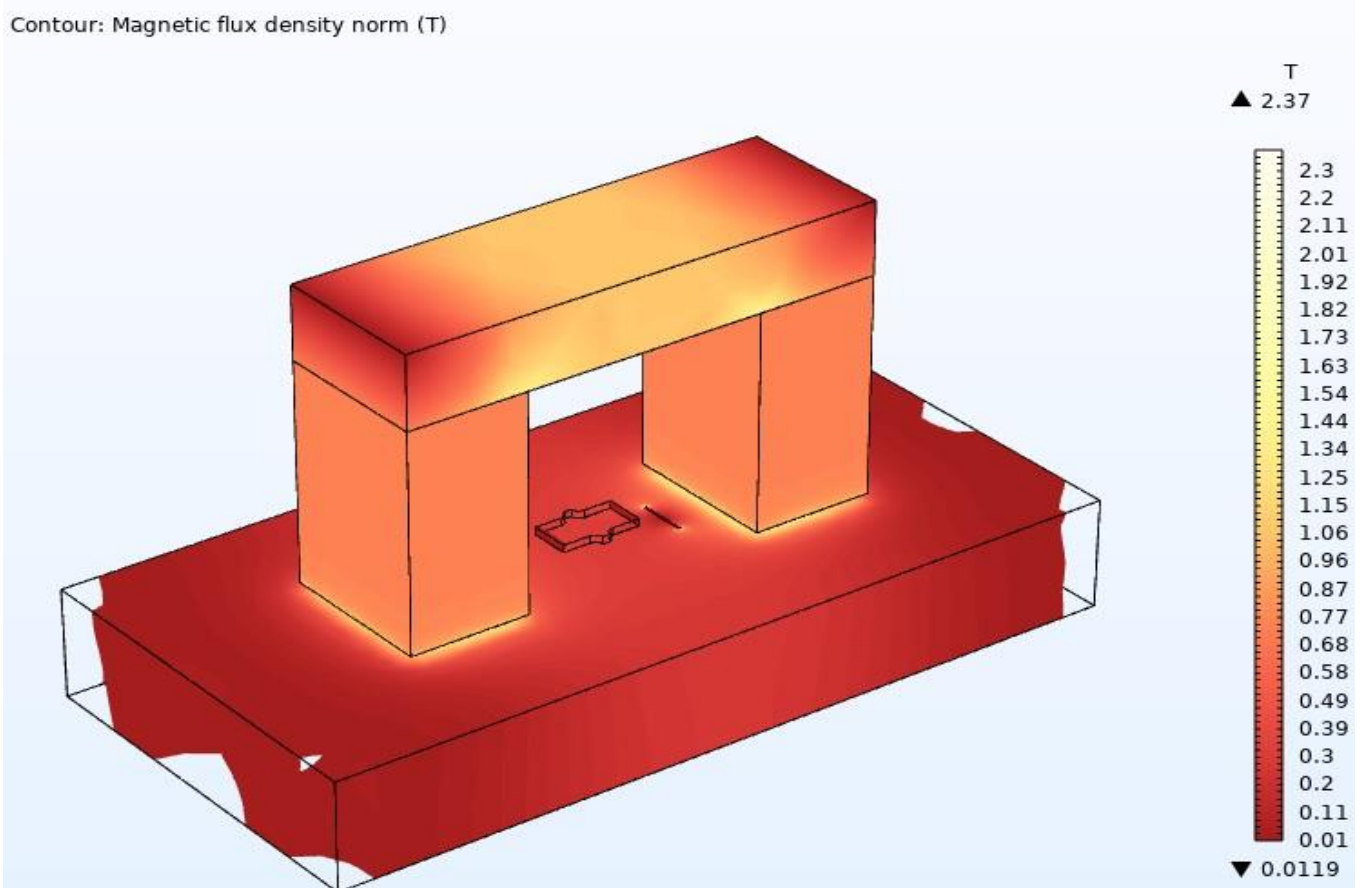
**Figure III.55** Affichage des lignes de flux magnétique En 3D dans le cas « Avec défaut »



**Figure III.56** Affichage des flèches de flux magnétique dans le cas « Avec défaut »

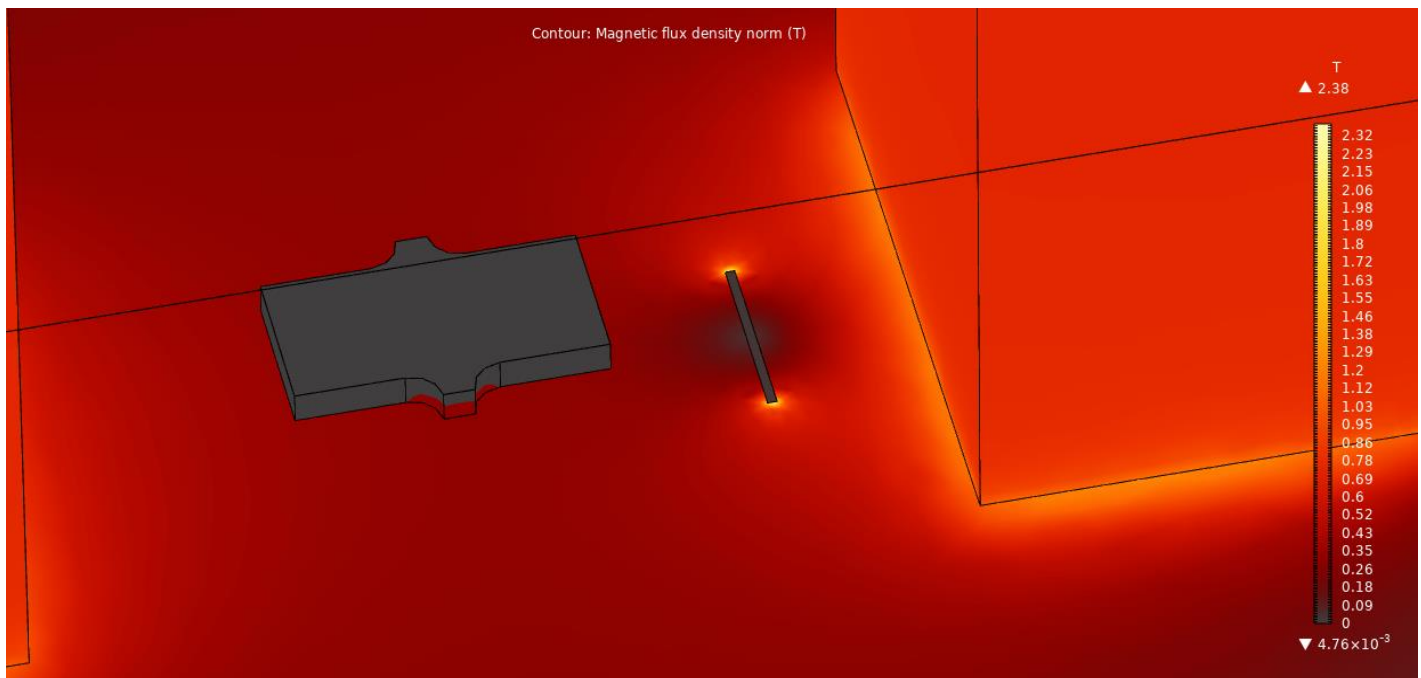


**Figure III.57** Affichage zoomé des flèches de flux magnétique dans le cas « Avec défaut »



**Figure III.58** Affichage zoomé de la densité de flux magnétique dans le cas « Avec défaut »

Le maillage (figure III.53) et les lignes (figure III.54) et les flèches (figure III.57) représentent la densité de flux magnétique B et son interaction avec l'échantillon dans le cas sans défaut.



**Figure III.59** Affichage zoomé de la densité de flux magnétique dans le cas « Avec défaut »

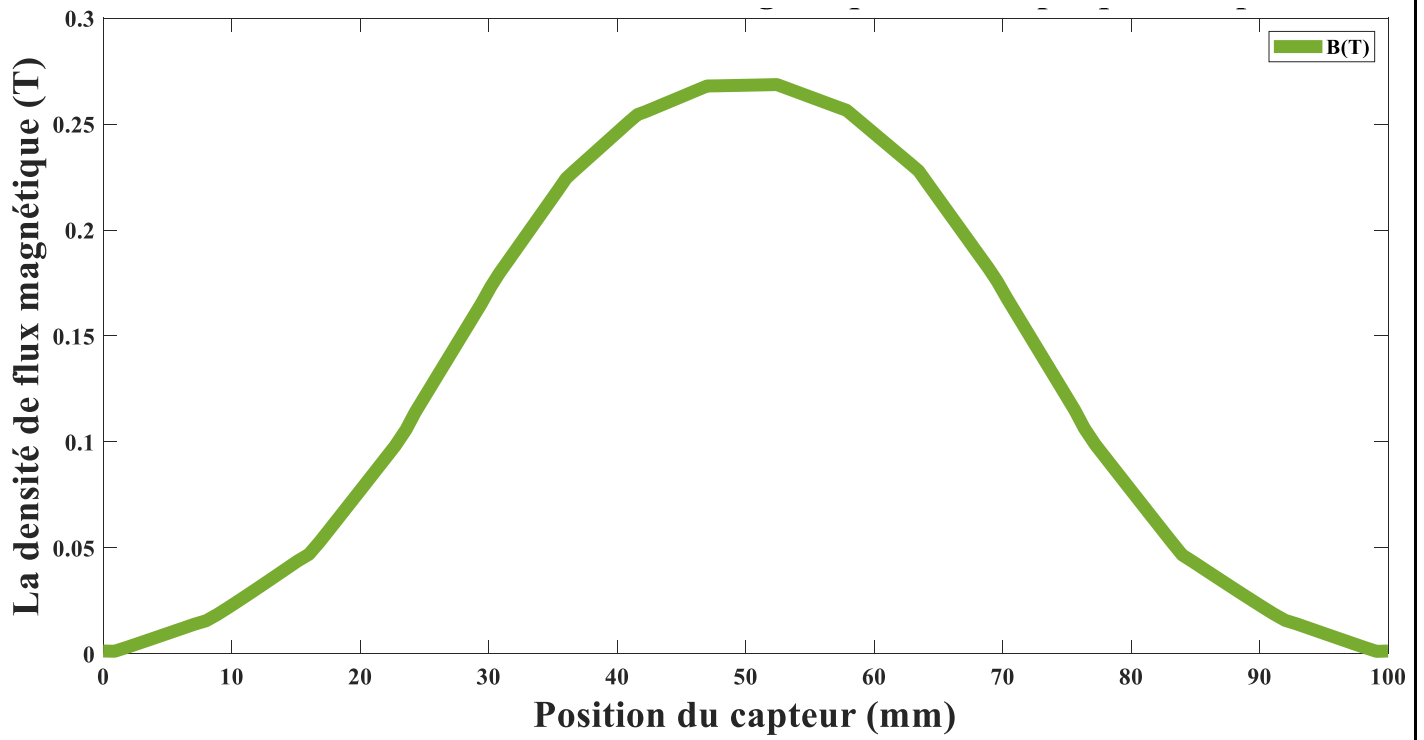
### III.3.3.2.a) Interprétation des résultats

#### a. Sans défaut

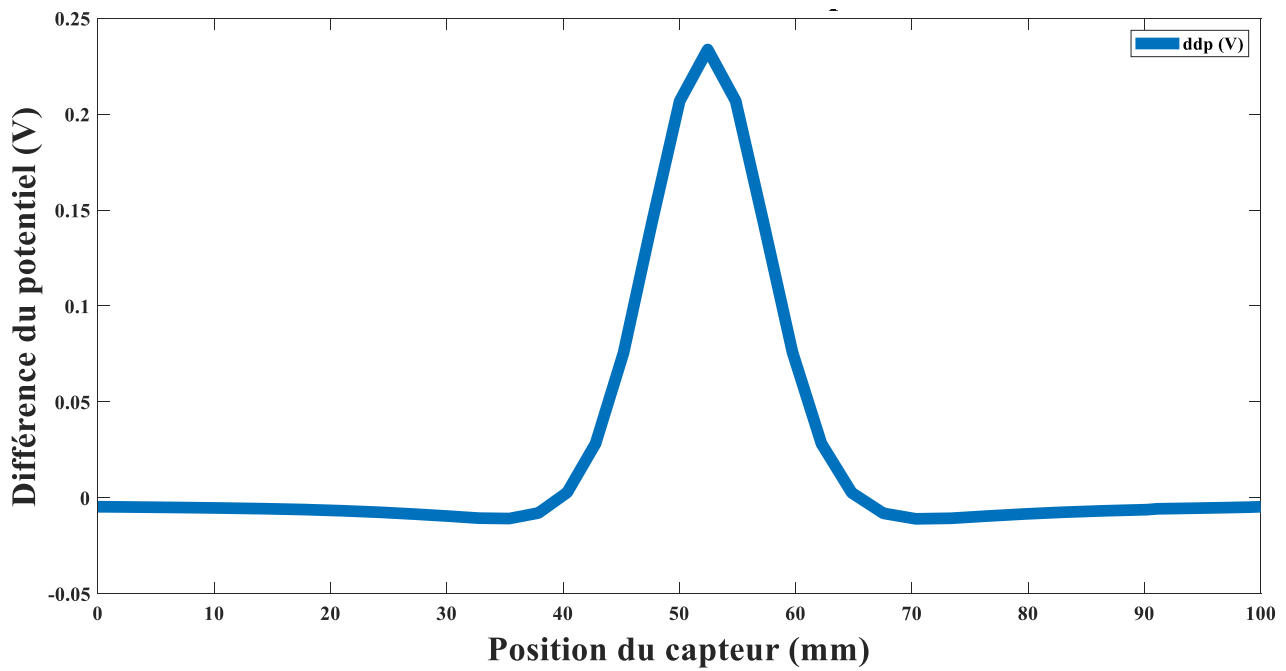
Les figures obtenues grâce au logiciel COMSOL révèlent un maillage fin et précis, des lignes de flux magnétique bien réparties et des flèches de flux homogènes sur une plaque de fer sans défaut. La distribution uniforme du champ magnétique est confirmée par ces visualisations, ce qui suggère l'absence de perturbations causées par des défauts dans la plaque.

#### b. Avec défaut

Les figures fournies par le logiciel COMSOL révèlent un maillage (Mesh) et présente une distribution précise des éléments, garantissant une grande précision. Les lignes de flux mettent en évidence les perturbations provoquées par le défaut, tandis que les flèches de flux montrent la direction et l'intensité des champs magnétiques autour de l'anomalie, ce qui met en évidence les zones critiques.



**Figure III.60** La variation de la densité de flux magnétique par rapport à la position du capteur



**Figure III.61** La variation de la différence de potentiel aux bornes du capteur

### III.3.3.2.b) Interprétation des résultats

- a. La première courbe montre la variation de la densité du flux magnétique (en Tesla) basée sur la position du capteur sur une plaque magnétique, en utilisant la méthode du flux magnétique (MFL). La courbe indique une augmentation progressive de 0 mm à 50 mm, puis une diminution symétrique à 100 mm. La densité de 50 mm indique un défaut ou une anomalie dans la plaque.
- b. La deuxième courbe présentée montre la différence de potentiel en fonction de la position du capteur sur une plaque de sonde de flux magnétique (MFL). Une augmentation significative du potentiel est observée, avec un pic d'environ 50 mm avant symétrie. Cela indique un défaut ou une anomalie dans la plaque à la position 50 mm. Cette variation est généralement associée à un défaut comme des fissures ou des zones de corrosion, qui perturbent le champ magnétique et provoquent un flux magnétique détectable.

### III.3.4 Interprétation des résultats donnée par COMSOL

Comme indiqué ci-dessus dans les résultats fournis par le logiciel multiphysique COMSOL lors de l'étude de la détection des défauts par flux de fuite magnétique, nous constatons que la simulation a été un succès, car lors de la comparaison des résultats du contrôle dans les deux cas (avec et sans défaut), nous voyons des différences dans le schéma de diffusion de la densité de flux magnétique  $B$  sur la plaque ferromagnétique sous de nombreuses formes, y compris (mesh, flèches, lignes de flux magnétique etc...). Par exemple, en l'absence de défaut, le paradigme d'interaction de la densité de champ semble normal sans défauts dans la plaque à inspecter. Par conséquent, dans le cas d'un défaut, il y avait une certaine distorsion, en d'autres termes, lorsque le champ magnétique passe au-dessus du défaut (dont sa propriété matérielle dans cette condition est l'air), des fuites de flux magnétique dans le défaut créent une distorsion (perturbation).

### III.4 Conclusion

Dans le domaine universitaire, les institutions de recherche et l'industrie, COMSOL Multiphysics est couramment employé afin de résoudre des problèmes scientifiques et d'ingénierie complexes. En combinaison avec une documentation exhaustive et des tutoriels, il constitue un outil précieux pour faire avancer l'innovation et résoudre des problèmes concrets. De plus, il m'a permis de simuler le contrôle par flux de fuite magnétique en utilisant une servitude et des résultats adéquats.

Au cours de ce chapitre, nous avons exploré FEMM & COMSOL Multiphysics ainsi que leurs caractéristiques, ce qui nous a donné la possibilité de simuler le modèle 2D et 3D d'MFL et de tester son fonctionnement en l'absence et en présence d'un défaut dans un matériau ferromagnétique.

## Conclusion générale

Le CND est une méthode qui garantit le bon fonctionnement des appareils et du matériel, en les préservant de toute fissure et en augmentant la sécurité du personnel. Son évolution a été significative en raison d'une part de la complexité grandissante des pièces à contrôler, et d'autre part de l'avancement de l'informatique et des techniques numériques qui ont permis des modélisations et des traitements de données performants.

MFL est une méthode de contrôle volumique du matériau qui permet de détecter les diminutions d'épaisseur dues à la corrosion de tôles. C'est une méthode d'auscultation rapide, non quantitative, avec laquelle les contrôles par ultrasons sont souvent utilisés, lorsque leur mise en œuvre est possible, pour confirmer et mieux quantifier les informations obtenues. La méthode est généralement appliquée sur les fonds de bacs de stockage, met en évidence sur des matériaux ferromagnétiques des pertes d'épaisseur par caractère affectant l'une ou l'autre des faces de la tôle.

La modélisation mathématique utilisée pour résoudre les problèmes mathématiques concernant l'MFL est basée sur le développement des équations de Maxwell dans lesquelles elles décrivent la formulation magnétostatique.

La méthode des éléments finis est la méthode fiable pour résoudre des équations aux dérivées partielles complexes et pour simuler des phénomènes physiques dans divers domaines de la science tels que ce que nous avons étudié dans ce projet de fin d'étude (un problème électromagnétique).

Il existe de nombreux logiciels qui peuvent utiliser la MEF (méthode des éléments finis) comme ce que nous avons choisi de travailler dans cette recherche « FEMM » et « COMSOL Multiphysics », ces deux programmes ont une bibliothèque MEF intégrée dans eux spécifiquement pour résoudre ces problèmes.

Nous avons rencontré quelques difficultés dans la modélisation et simulation du contrôle non destructif par utilisation de flux de fuite magnétique tel que :

- **Modélisation précise de la pièce à inspecter** : il est essentiel de modéliser correctement la géométrie et les matériaux de votre dispositif (aimants, capteur, plaque à inspecter).
- **Analyse et interprétation des résultats** : L'interprétation des résultats de simulation peut être délicate en raison de la complexité des phénomènes magnétiques. Il est parfois difficile de distinguer les effets significatifs des variations insignifiantes du flux de fuite magnétique.

Comme perspectives de ce travail :

- ✚ Une étude expérimentale afin de valider les résultats obtenus par la simulation.
- ✚ Une simulation du comportement magnétique du système avec la prise en compte de d'autres paramètres comme le lift-off dans le cas linéaire et non linéaire.
- ✚ Une étude et une modélisation tridimensionnelle 3D approfondie du système avec la prise en compte de la saturation magnétique des matériaux.



# Bibliographie

- [1] Emna amira fnaiech, « développement d'un outil de simulation du procédé de contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par un capteur à flux de fuite », thèse de doctorat. Physique, université de paris-sud paris xi, 16 nov 2012.
- [2] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Techniques de l'ingénieur, dossier R1400, janvier 1996.
- [3] Mehieddene, Hamid. Étude du contrôle et de l'évaluation non-destructifs dans les milieux magnétiques. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, 2019.
- [4] Mohammed CHERFAOUI, " Essais non destructif (END)", Techniques de l'ingénieur, Dossier BM 6 450, Octobre 2008.
- [5] Sidibé Sékou, Silamakan, and Mohamed Bouziane. Contrôle non destructif par ultrason. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2019.
- [6] Perdijon, Jean. Le contrôle non destructif par ultrasons. Hermes, 1993.
- [7] cofrend - COURANTS DE FOUCAULT (ET).  
(S. d.). [https://www.cofrend.com/jcms/mdc\\_110676/fr/courants-de-foucault-et](https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110676/fr/courants-de-foucault-et)
- [8] S.Djafa,Tchuspa. Développement et optimisation d'un modèle numérique 3D pour la simulation d'un system dédié au contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par flux de fuite. THESE DE DOCTORAT. Physique. UNIVERSITE DE PARIS-SUD. 10 Décembre 2013.
- [9] Patrick Poulichet, Page Internet de l'enseignant chercheur en électronique et CEM, ESIEE Paris Le grande cedex
- [10] Gaouir, Chemseddine, Rassim Rezkoune, and Tarek Encadreur Hacib. Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique. Université de Jijel, 2019.
- [11] Bilal Hannouf, Ammar Zeddou, « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », mémoire de mastère, Université de Jijel, Juin 2018.
- [12] Paul Leroy. Mesure des champs magnétiques alternatifs et continus dans les plasmas naturels : développement d'un magnétomètre searchcoil à bande étendue. THESE DE DOCTORAT. Physique. Université Versailles-Saint Quentin en Yvelines.1 janvier 2007.
- [13] Rimound Hamia, « Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault », doctorat Electronique, Université de Caen/Basse Normandie, 02 Novembre 2011.
- [14] Cyril Ravat, « Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif », thèses Doctorat Sciences et Technologies, Université paris sud 11, 2008.

- [15] El Ghouli, Islam Nacereddine. Réalisation D'un Banc D'essais Pour L'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault. Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [16] M'zali, Nabil. Etude des problèmes de la compatibilité électromagnétique dans un circuit imprimé. Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [17] Teghlil, Farouk, Abdelmalik Laouira, and Tarek Encadreur Hacib. Scanner à flux de fuite magnétique pour l'inspection des tôles ferromagnétiques. Université de Jijel, 2021.
- [18] Lakhdari Lakhdari AbdelHalim, «Study, modeling and simulation of the NDT eddy currents by finite element software in 2D and 3D». Université Abd el hamid ibn badis Mostaganem, 2023.
- [19] Djafri boualam, Metidji amer, « Étude et modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents insérés » Université A.MIRA-BEJAIA
- [20] Zakaria KEBBAL, Abdenmour LEMEZERI, « Contrôle Non Destructif Par Utilisation De Flux De Fuite Magnétique Étude Et Simulation » École supérieure en génie électrique et énergétique d'Oran
- [21] Golovanov, Cristian. Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique : application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1997.
- [22] SBAI Abdelaaziz « Méthode des volumes finis pour L'équation de convection-diffusion » UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH