

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou**



**Faculté de Génie de Construction**

**Département de Génie Mécanique**

**Mémoire de fin d'étude de master académique**

Spécialité : Electromécanique

Filière : Maintenance industrielle

## **Thème**

**Modélisation par Eléments finis des phénomènes magnéto-élastiques**

**Application au transformateur triphasé 50KVA/30KV\_0.4KV**

Présenté par

BOUKHERROUB Lila

MENOUER Thiziri

Mémoire soutenu le 11 /03 /2021 devant le jury composé de :

Mr HOCINI Farid	MCB	Université de Tizi-Ouzou	Président
Mr NAIT OUSLIMANE Ahmed	MAA	Université de Tizi-Ouzou	Rapporteur
Mr HAMEL Meziane	MCB	Université de Tizi-Ouzou	Examineur
Mr CHELLI	MAA	Université de Tizi-Ouzou	Examineur

Promotion 2019/2020

# Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu le bon DIEU de nous avoir donné le courage et la patience et santé physique et mentale pour faire ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur M<sup>r</sup> A.NAIT-OUSLIMANE maitre assistant classe A à l'université MOULOUD MAAMRI de TIZI OUZOU, de nous avoir proposée ce sujet, et guidé le long de notre travail.

Nous tenons à lui exprimer notre gratitude pour son attention et ses précieux conseils.

Nous présentons nos remerciements à toute l'équipe du département sciences appliquées.

Nous adressons également nos vifs remerciements au personnel du service construction transformateurs, plus précisément Mmes CHAOUCHI, D.HOCINI, et Mrs H.LAGAB et AIT-IZEM, ainsi que le responsable du service formation MOULOUD.

On remercie le président et les membres de jury pour nous avoir honorés d'examiner ce travail.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents pour leur amour inestimable, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer et surtout à :*

*Ma sœur et son mari.*

*Mes neveux Amayas et Aksil.*

*Mon cher frère.*

*Mes nièces Maya et Marie.*

*A mes ami(e)s.*

*A tous mes camarades de la promotion maintenance industrielle.*

*M.Thiziri*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail a tous ceux qui me sont chers, ceux qui m'ont soutenu, m'ont apporté une aide morale ou directe et qui m'ont motivé a achever a bien cette étude, surtout a :*

*Mon père l'épaule solide, la personne la plus digne de mon estime et mon respect, pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur.*

*Ma tendre et douce mère, à l' œil attentif compréhensif, qui ma bénie par ses prières.*

*Mon frère Belaid.*

*Mes sœurs et leurs maris.*

*Ma petite sœur Ania.*

*Mon neveu Amayas.*

*Ma nièce Nihal.*

*A mes ami(e)s.*

*A tous mes camarades de la promotion maintenance industrielle.*

*B.Lila*

## Cahier des charges

Puissance nominale .....  $S_n=50$  KVA

Tension nominale primaire .....  $U_{1n}= 30$  KV

Courant nominal primaire .....  $I_{1n}= 0,96$  A

Couplage primaire..... Étoile (Y)

Tension nominale secondaire .....  $U_{2n}= 0,4$  KV

Courant nominal secondaire .....  $I_{2n}= 72.2$ A

Couplage secondaire ..... Zigzag

Indice horaire ..... 11

Fréquence ..... 50Hz

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Matériaux magnétostrictifs et leurs application.</b>	
I.1) Introduction.....	2
I.1.1) Les matériaux magnétostrictifs.....	2
I.1.2) Définition .....	2
• Les métaux.....	2
• Les terres rares.....	2
I.3) Magnétostriction d'un cristal.....	3
I.4) Magnétostriction d'un composé polycristalin .....	3
I.5) Domaine d'application.....	4
✓ Capteur magnétostrictif.....	4
✓ Les actionneurs magnétostrictifs.....	5
✓ Emetteurs-récepteurs d'ondes élastiques.....	6
I.6) Magnétisme.....	6
I.6.1) Grandeurs magnétiques.....	7
I.6.1.1) Champ d'induction magnétique.....	7
I.6.1.2) Champ d'excitation magnétique.....	7
I.6.1.3) Flux magnétique.....	8
• Définition.....	8
I.6.2) Lois fondamentales du magnétisme.....	8
I.6.2.1) Lien du champ d'excitation au courant électrique : Théorème d'Ampère.....	8
I.6.2.2) Lien du flux magnétique à la tension : Loi de Faraday et Loi de Lenz.....	8
I.6.2.3) Formule de Boucherot.....	9
I.6.2.4) Actions magnétiques : Loi de Lorenz et Laplace.....	10

I.6.2.4.1) Lien induction-mouvement : Loi de Lorenz.....	10
I.6.2.4.2) Lien induction-courant : Loi de Laplace.....	10
I.6.3) Milieux magnétiques isotropes.....	10
I.6.3.1) Relation entre l'induction magnétique B et le champ d'excitation H.....	10
I.6.3.2) Classification des matériaux d'un point de vue magnétique.....	11
a) Matériaux diamagnétiques.....	11
b) Matériaux paramagnétiques.....	11
c) Matériaux ferromagnétiques.....	12
I.6.4) Polarisation des matériaux ferromagnétiques.....	12
I.6.4.1) Organisation en domaines : Domaine Weiss.....	12
• Paroi de Bloch.....	13
I.6.4.2) Courbe de première aimantation.....	13
I.7) Phénomène magnétostrictif.....	14
a) Effet d'une contrainte sur le comportement magnétique.....	14
b) Contraintes subies par les transformateurs.....	15
▪ Contraintes diélectriques.....	15
▪ Contraintes électriques.....	15
▪ Contraintes électrodynamiques.....	15
▪ Contraintes électromagnétiques.....	15
▪ Contraintes mécaniques.....	16
▪ Contraintes thermiques.....	16
▪ Contraintes chimiques.....	16
I.8) Origines des vibrations dans les transformateurs.....	16
I.8.1) Sources de bruit d'un transformateur.....	16
Conclusion.....	17

## **Chapitre II : Généralités sur les transformateurs**

II.1) Introduction.....	18
II.2) Définition d'un transformateur.....	18

II.3) Symbole d'un transformateur.....	19
▪ Rapport de transformation.....	19
II.4) Principe de fonctionnement.....	19
II.5) Constitution d'un transformateur.....	20
1. Partie active.....	20
a. Circuit magnétique.....	20
➤ Réalisation.....	21
b. Enroulement.....	23
➤ Réalisation.....	23
c. Isolants.....	24
• Isolation.....	24
• Accessoires.....	25
• Refroidissement.....	25
2. Partie constructive.....	25
a) La cuve.....	25
b) Réalisation.....	25
c) Le couvercle.....	27
➤ Réalisation.....	27
d) Le conservateur d'huile.....	28
➤ Réalisation.....	28
e) Isolateurs et traversées.....	28
II.6) Pertes magnétiques dans le transformateur.....	28
▪ Les pertes fer.....	29
▪ Les pertes par Courants de Foucault.....	29
▪ Les pertes par hystérésis.....	29
▪ Les pertes Joules.....	29
II.7) Types de transformateurs.....	29
II.7.1) Transformateur à colonne.....	29
II.7.2) Transformateur cuirassé.....	30
II.8) Différents modes de couplages.....	31
II.8.1) Choix des couplages.....	32
II.9) Défauts.....	33
➤ Les causes des défauts.....	34

Conclusion.....	34
-----------------	----

### **Chapitre III : Modèle mathématique des phénomènes couplés**

III.1) Introduction.....	35
III.2) Equation de Maxwell.....	35
a) Forme différentielle des équations de Maxwell.....	35
b) Forme intégrale des équations de Maxwell.....	36
III.3) Equation électromagnétique.....	38
III.3.1) Hypothèse simplificatrice.....	38
III.3.2) Equation électromagnétique.....	38
III.4) Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique.....	39
III.4.1) Equation magnétodynamique bidimensionnelle.....	40
III.4.2) Equation magnétostatique bidimensionnelle.....	41
III.5) Formulation utilisant le potentiel scalaire magnétique.....	42
III.5.1) Potentiel scalaire magnétique total.....	42
III.5.2) Potentiel scalaire magnétique réduit.....	43
III.6) Condition de passage entre deux milieux.....	44
III.7) Notion d'énergie de co-énergie magnétique.....	45
III.8) Force magnétique.....	46
III.9) Modélisation des phénomènes élastiques.....	48
III.9.1) Discrétisation Eléments Finis.....	49
III.10) Modélisation des phénomènes magnéto élastiques.....	50
III.10.1) Définition.....	50
III.10.2) Aspect macroscopique.....	50

III.11) Déformation de magnétostriction.....	51
III.12) Aspect microscopique.....	51
III.13) Procédure de simulation des vibrations d'origine électromagnétique.....	54
III.14) Terme du couplage magnéto élastique.....	55
Conclusion.....	55

## Chapitre IV : Applications et résultats

IV.1) Introduction.....	56
IV.2) Géométrie et dimensions du transformateur triphasé.....	56
➤ Les caractéristiques géométriques.....	57
➤ Courbe de B en fonction de H du matériau utilisé (steel_1008).....	58
➤ Les caractéristiques magnétiques du transformateur.....	58
➤ Les caractéristiques électriques du transformateur.....	58
➤ Composition chimique du noyau magnétique.....	59
IV.3) Applications.....	59

### APPLICATION 1 ESSAI : Simulation des propriétés magnétique du transformateur.....60

➤ La géométrie du transformateur.....	60
➤ Le maillage.....	61
➤ Calcul des inductances.....	61
➤ Représentation des allures de force.....	62
➤ Répartition du potentiel vecteur magnétique A.....	64
➤ Répartition de l'induction magnétique B.....	66
➤ Répartition des vecteurs de densité des forces magnétiques.....	69
➤ Représentation des tensions.....	71
➤ Représentation du potentiel et induction magnétique aux instants $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ .....	72

### APPLICATION 2

<b>Partie I</b> : Simulation du problème magnétostrictif.....	75
I.1) Distribution de la déformation.....	76
I.2) Répartition du potentiel vecteur magnétique A.....	79

I.3) Distribution du champ magnétique H.....	81
I.4) Répartition de l'induction magnétique B.....	83
I.5) Répartition des vecteurs de densité des forces magnétiques.....	85
<b>Partie II : Etude et simulation de l'influence des défauts.....</b>	<b>124</b>
II.1) Déformation sous une contrainte de 0MPa avec un seul défaut.....	124
II.2) Déformation et induction sous une contrainte de -19MPa avec un seul défaut.....	125
II.3) Déformation et induction sous une contrainte de -39MPa avec un seul défaut.....	126
II.4) Déformation et induction sous une contrainte de -55MPa avec un seul défaut.....	127
II.5) Déformation et induction sous une contrainte de -74MPa avec un seul défaut.....	128
II.6) Déformation et induction sous une contrainte de -19MPa avec plusieurs défauts.....	130
II.7) Déformation et induction sous une contrainte de -74MPa avec plusieurs défauts.....	131
II.8) Courbe de tension induite sous l'effet de contrainte de -74MPa.....	132
○ Comparaison de la déformation de magnétostriction avec et sans défauts.....	134

### **APPLICATION 3**

<b>Partie 1 : Etude structurelle du couplage magnéto mécanique sous Ansys Mechanical.....</b>	<b>136</b>
III) Couplage magnéto mécanique.....	136
III.1) Introduction.....	136
III.2) Maillage.....	136
III.3) Amplitude du déplacement.....	137
III.4) Représentation de la contrainte.....	138
III.5) Représentation de la déformation élastique.....	139
III.6) Représentation de la contrainte en fonction du déplacement.....	140

<b>Partie 2 : Etude de l'effet de contrainte mécanique (traction)</b> .....	140
Conclusion.....	144
<b>Conclusion générale</b> .....	145
<b>Bibliographie</b> .....	146
<b>Résumé</b> .....	147
<b>Liste des Tableaux</b>	
<b>Liste des Figures</b>	

## Introduction générale

La révolution scientifique et technique qui modèle notre civilisation résulte du progrès de la technologie dans différents domaines. Parmi ces derniers, figure au premier plan l'énergie électrique dont la demande et l'utilisation de plus en plus grandes ont imposé aux producteurs de cette énergie des adaptations de leur stratégie de distribution ainsi que des domaines d'exploitation.

En effet, le transformateur est un composant fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Goulard et John-Dixon Gibbs en 1883. Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (de quelques 100 KVA en 1900, à quelques MVA en 1910). Le transformateur a donc eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique.

Un transformateur est une machine statique capable de recevoir l'énergie électrique sous une tension et un courant à fréquence donnée, et de la restituer avec une autre tension et un autre courant à la même fréquence.

Le transformateur est un élément très important dans les réseaux électriques (transport et distribution de l'énergie électrique), il doit assurer la continuité de l'alimentation en électricité aux consommateurs HT et BT.

Pour décrire de façon très fine et de manière générale son fonctionnement, il est indispensable de considérer l'interaction entre les champs magnétiques et électriques. Ceci constitue un couplage physique fort, car les grandeurs électriques et magnétiques sont significativement dépendantes les unes des autres.

Le but de ce travail est d'estimer la déformation d'un transformateur constitué de tôles empilées soumis à un chargement magnétique et compression en un premier lieu et en un second à une contrainte mécanique extérieure (traction). Il s'agit d'une approche numérique par éléments finis qui suppose le développement préalable et l'implémentation d'une loi de comportement magnéto-élastique. Ce présent travail a pour objectif la recherche d'un modèle de comportement magnéto-mécanique et modélisation numérique appliquée aux transformateurs.

Nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre : Matériaux magnétostrictifs et leurs applications.
- Le deuxième chapitre: Généralités sur les transformateurs.
- Le troisième chapitre: Modélisation mathématique des phénomènes couplés magnéto-élastiques.
- Le quatrième chapitre: Application et résultats.



## **I.1 Introduction**

La diversité des matériaux permet de les classer en plusieurs familles, parmi celles-ci la famille des matériaux actifs à laquelle appartiennent les matériaux magnétostrictifs. Ce chapitre a pour but d'exposer d'une façon générale les différents aspects liés à la magnétostriction. Dans la première partie nous définissons le phénomène magnétostrictif et donnons plusieurs rappels sur le magnétisme afin de permettre une bonne compréhension des effets impliqués.

## **I.2 Les matériaux magnétostrictifs**

### **I.2.1 Définition**

Un barreau de fer soumis un a champ magnétique longitudinal s'allonge suivant ce champ, en même temps qu'il se contracte transversalement comme sous l'effet d'une traction mécanique. Ce phénomène découvert par joule en 1842 fut nommé magnétostriction.

La magnétostriction est l'ensemble des relations liant les propriétés mécaniques d'un corps à ses propriétés magnétiques.

Les principaux matériaux magnétostrictifs peuvent être séparés en deux groupes : les métaux (Fer, Cobalt, Nickel...), les alliages métalliques, les ferrites d'un côté, et les alliages à base de terre rare de l'autre. L'évaluation des performances d'un matériau magnétostrictif se fait par la mesure de son coefficient de magnétostriction à saturation  $\lambda_s$  et par son coefficient de couplage magnéto-mécanique. [1]

La coercivité (résistance aux champs magnétique ambiants) du matériau doit donc être aussi faible que possible pour permettre une magnétostriction maximale en champ faible (moins de 1 kA/m) ; c'est un aspect important de ces nouveaux matériaux si on veut les rendre compétitifs. [1]

- **Les métaux [1]**

Le nickel et les alliages métalliques ont été les premiers matériaux sur lesquels l'effet magnétostrictif fut observé; le nickel, par exemple, présente un coefficient de saturation  $\lambda_s$  de -33 ppm. En général, les alliages métalliques ont une magnétostriction qui reste inférieure à 100. Par contre leur température de Curie est élevée ce qui garantit une bonne stabilité thermique et un fonctionnement à température ambiante.

Les ferrites ont une magnétostriction plus importante. Elles peuvent être utilisées à des fréquences élevées et présentent un fort rendement électro-acoustique. Le principal problème est leur fragilité.

Les performances de ces matériaux ne permettent pas d'envisager des applications intéressantes (ces effets sont surtout visibles dans certaines applications).

- **Les terres rares [1]**

Les terres rares possèdent des coefficients de magnétostriction extrêmement importants (de l'ordre de 1000 ppm) mais à des températures cryogéniques. Les terres rares sont en effet caractérisées par la forme anisotrope de leur nuage électronique 4f. Cette forme progresse de

façon régulière dans la colonne de "lanthanides" au fur et à mesure que des électrons sont ajoutés. Ainsi, comme cela est illustré, le Samarium ressemble à un ballon de rugby alors que le Terbium est plus aplati.

### I.3 Magnétostriction d'un cristal [1]

Le phénomène magnétostrictif est un couplage entre champ magnétique et contrainte mécanique dans un matériau ferromagnétique. L'application d'un champ magnétique modifie les liaisons interatomiques du réseau cristallin, ce qui a pour effet de déformer le cristal. Ces déformations dépendent de l'orientation relative du cristal et du champ magnétique et aussi de l'amplitude du champ. Pour les métaux magnétostrictifs la déformation et le champ magnétique sont coaxiaux [25], [26].

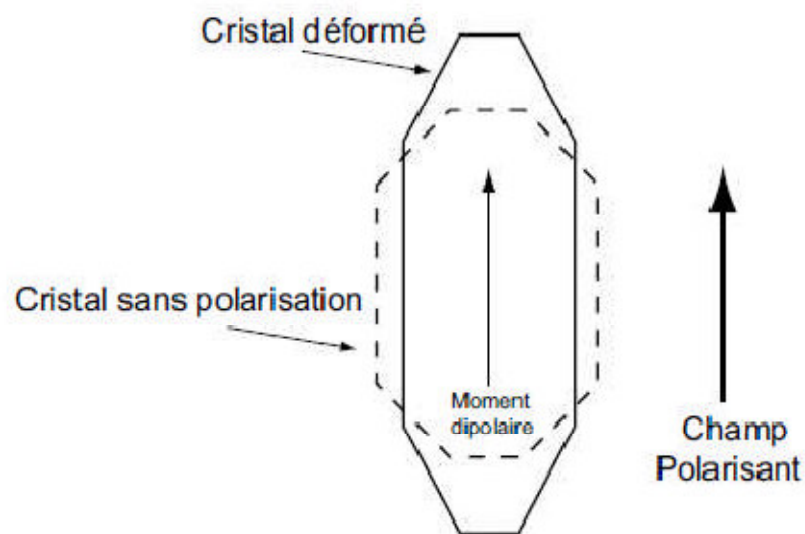
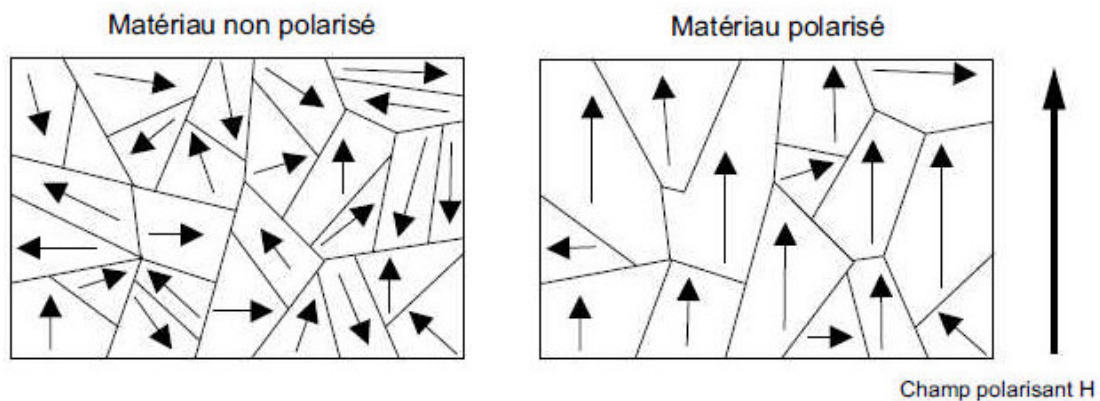


Figure I.1 Schéma de principe de la magnétostriction d'un cristal [1]

### I.4 Magnétostriction d'un composé poly cristallin [1]

Les matériaux ferromagnétiques sont des composés poly cristallins complexes à décrire (Figure I-2). La magnétostriction d'un métal est fortement liée à celle des cristaux le composant, mais pas seulement. Lorsqu'un champ magnétique lui est appliqué tous les cristaux sont déformés d'une quantité liée à leur orientation par rapport au champ extérieur.

Pour un métal non polarisé tous les domaines cristallins sont orientés de manière aléatoire et donc la déformation sera la résultante des différentes directions propres de déformation. La magnétostriction d'un métal ne peut se comprendre que comme la valeur moyenne (macroscopique) sur un très grand nombre de domaines d'une déformation (microscopique) d'un cristal [27].



**Figure I.2 Variations de l'orientation relative des domaines sous l'effet d'un champ polarisant [1]**

### **I.5 Domaine d'application [3]**

#### **✓ Capteur magnétostrictif [3]**

Les matériaux ferromagnétiques exposent un effet magnétostrictif inverse qui se traduit par la modification de la susceptibilité magnétique en présence de contraintes mécaniques dans le matériau. C'est cet effet inverse que l'on va aussi exploiter dans les capteurs de déplacement.

Les matériaux ferromagnétiques employés peuvent être le fer, le nickel, ou des alliages aluminium-fer (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment utilisé soit le Terfenol-D, du fait de ses bonnes performances magnétostrictives. [25]

Ce type de capteur possède les caractéristiques suivantes :

- Permet des courses importantes (parfois jusqu'à 2 m) et supporte des pressions élevées. On l'emploie préférentiellement dans les vérins hydrauliques.
- Mesure précise absolue.
- Sans usure et sans entretien, puisque il y'a absence de contact.
- Insensibles aux chocs, aux vibrations et aux saletés.
- Durabilité élevée et longévité accrue.



**Figure I.3 Capteurs magnétostrictifs**

✓ **Les actionneurs magnétostrictifs [1]**

La capacité que possède ce type d'actionneurs à développer des forces très importantes présente un avantage majeur. Ils furent utilisés pour la première fois par l'armée pour réaliser la fonction de sonar dans les sous marins.

Dans les années 1970, les matériaux à magnétostriction géante n'étaient pas encore connus et des matériaux tels que le nickel étaient utilisés. Ces matériaux présentaient des déformations très faibles 33 ppm (parties par million) pour le nickel et les actionneurs avaient une taille et un poids conséquents [29].

La découverte des matériaux à magnétostriction géante a permis d'élargir les domaines d'applications de ces actionneurs et depuis quelques années de nouvelles applications potentielles sont à l'étude. Leur déplacement est supérieur aux actionneurs piézo-électriques mais inférieur aux actionneurs électrodynamiques et électromagnétiques. Toutefois leur faible déplacement relatif limite le nombre des applications.

De plus, le coût très élevé pour les matériaux à magnétostriction géante les exclut des applications grand public et de la production en série [29].

Les déformations de ce type de matériaux sont de l'ordre du micromètre. Ces matériaux ont l'avantage d'être très robustes. Ce type d'actionnement est apprécié, car il ne nécessite pas de contact. Il est donc surtout utilisé dans des milieux confinés [31].

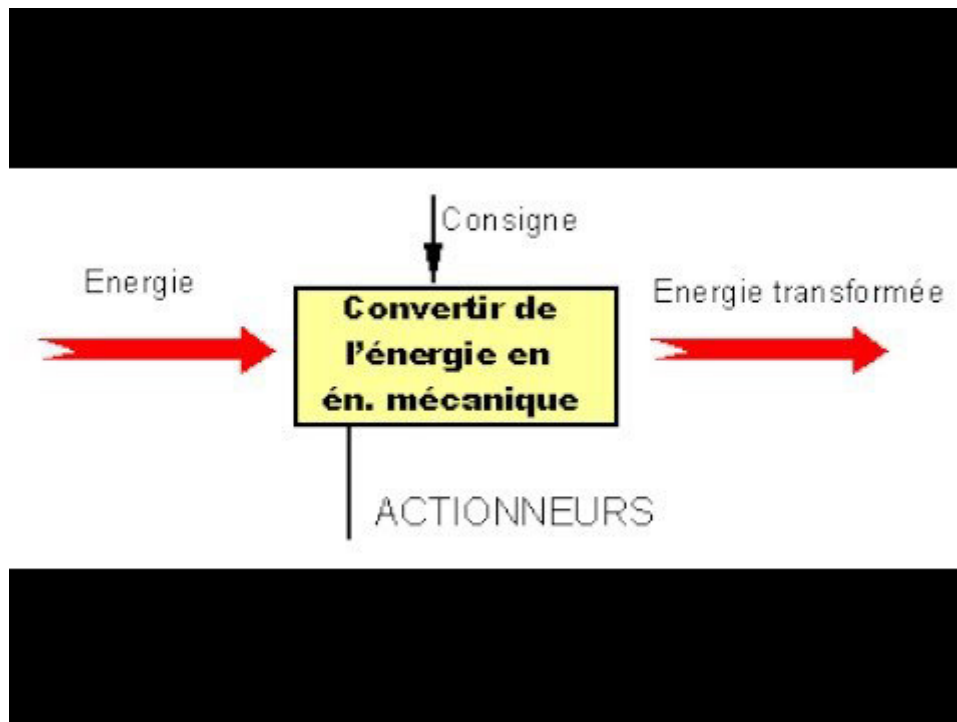


Figure I.4 Schéma de principe d'un actionneur

#### ✓ Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques [3]

Un résonateur magnétostrictif peut être utilisé comme transducteur émetteur ou récepteur d'ondes élastiques.

C'est dans le domaine des projecteurs ultrasonores basse fréquence (500 Hz par exemple) pour des applications sous-marines que le Terfenol-D présente des avantages importants par rapport aux céramiques piézoélectriques.

### I.6 Magnétisme [13], [2]

Les grandeurs tension et courant interviennent parfois au sein de circuits électriques par le biais du phénomène magnétique, les grandeurs magnétiques sont donc fortement attachées aux comportements électriques. La connaissance des grandeurs magnétiques essentielles permet de comprendre leurs influences et leurs relations par rapport aux tensions et courants dans un circuit.

Les phénomènes magnétiques sont le fruit du mouvement des charges électriques. La grandeur vectorielle champ d'induction magnétique émane directement de ces mouvements grâce à la loi de Biot et Savart. L'autre grandeur importante, le champ d'excitation magnétique, vectoriel lui aussi, traduit l'influence du milieu. Dans les matériaux, ces vecteurs, inductions et excitation sont colinéaires. On distingue une dernière grandeur qu'est définie à partir de l'induction : le flux d'induction magnétique.

Les liens existants entre les grandeurs magnétiques et les grandeurs électriques sont définies par deux relations importantes. Le théorème d'Ampère qui relie le champ

d'excitation magnétique au courant circulant dans un circuit. L'induction magnétique découle de la tension telle que l'exprime la loi de Faraday.

### I.6.1 Grandeurs magnétiques

#### I.6.1.1 Champ d'induction magnétique

Le champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  traduit l'effet du mouvement des charges électriques :

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{q\vec{V} \wedge \vec{u}}{4\pi r^2} \quad (I.1)$$

$\vec{V}$ : Vitesse de la charge

r: Distance de la charge au point d'expression de support du vecteur unitaire

$\mu_0$ : perméabilité magnétique du vide.

Le champ d'induction magnétique est une grandeur vectorielle dépendant de l'espace (position) et du temps. L'induction s'exprime en tesla (T).

Si les charges parcourent un conducteur électrique on écrit localement la loi de Biot et Savart.

$$d\vec{B} = \frac{Id\vec{l} \wedge \vec{u}}{4\pi r^2} \quad (I.2)$$

dl : Longueur du circuit portant la charge.

r : Distance de l'élément  $d\vec{l}$  au point d'expression de  $d\vec{B}$ , support du vecteur unitaire  $\vec{u}$ .

La sommation de cette loi permet d'obtenir l'effet de toutes les charges en un point de l'espace.

Si le vecteur champ d'induction est identique en tout point de l'espace, le champ est dit uniforme.

Dans les problèmes technologiques que nous rencontrerons, l'induction magnétique sera une grandeur connue. Elle ne sera pas à déterminer par les relations précédentes.

#### I.6.1.2 Champ d'excitation magnétique

Le champ d'excitation magnétique  $\vec{H}$  prend compte de l'influence du milieu magnétique sur les grandeurs. Cet aspect sera particulièrement développé dans le cadre des «milieux magnétiques ». C'est une grandeur vectorielle dépendant de l'espace (position) et du temps. Le champ d'excitation magnétique s'exprime en Ampères par mètre (A/m). Dans le vide, l'induction et l'excitation sont colinéaires :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (I.3)$$

C'est aussi le cas dans un matériau isotrope mais avec un coefficient différent. Le vecteur champ d'excitation magnétique est tangent en tous points à une courbe orientée appelée ligne de champ.

### I.6.1.3 Flux magnétique

- **Définition**

Le flux du vecteur d'induction magnétique  $\vec{B}$  à travers une surface fermée (S) est définie par

$$\phi_s = \iint \vec{B} \vec{n} \, ds \quad (I.4)$$

Avec :

$\vec{n}$  : Vecteur normal à la surface S.

Le flux magnétique s'exprime en Weber (Wb).

## I.6.2 Lois fondamentales du magnétisme

### I.6.2.1 Lien du champ d'excitation au courant électrique : Théorème d'Ampère

La circulation du vecteur champ d'excitation magnétique  $\vec{H}$  le long d'une surface fermée (C) quelconque est égale à la somme algébrique des courants traversant la surface s'appuyant sur le contour (C).

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum_j (\pm I_j) \quad (I.5)$$

Le courant sera pris positivement s'il est dans le sens de la normale à la surface (règle du tire-bouchon par rapport au sens de parcours du contour C). Le courant sera pris négativement s'il est dans le sens contraire de la normale à la surface (règle du tire-bouchon par rapport au sens de parcours du contour C).

### I.6.2.2 Lien du flux magnétique à la tension : Loi de Faraday et La loi de Lenz

En étudiant en détail les divers phénomènes qu'il avait mis en évidence, Faraday a précisé de manière quantitative les divers facteurs qui influencent la valeur de la f.é.m. induite. Par exemple, la rapidité de la variation du champ magnétique influence clairement la valeur de la f.é.m., mais plus précisément, Faraday montre que c'est le rythme de variation du flux magnétique à travers la bobine de détection qui gouverne la valeur de cette tension induite. Le flux magnétique à travers une surface S se définit comme l'intégrale du produit de l'élément de surface par le champ magnétique :

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (I.6)$$

A la différence du théorème de Gauss, les flux magnétiques que nous allons considérer concernent des surfaces ouvertes et non des surfaces fermées. On introduit une unité de flux magnétique, le Weber, qui correspond à 1 Tesla x 1m<sup>2</sup>.

L'utilisation du flux magnétique permet de résumer les observations de Faraday sous une forme très simple :

$$e = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (I.7)$$

La force électromotrice induite dans un circuit est égale à l'opposé de la variation du flux magnétique à travers la surface limitée par le circuit. Cette loi s'appelle loi d'induction de Faraday. Si le flux est exprimé en Weber, la f.é.m. s'exprime directement en Volts et le coefficient de proportionnalité est égal à 1. Si la bobine de détection comprend plusieurs spires, on doit prendre en compte ces nspires dans la valeur de la f.é.m. produite :

$$e = -n \frac{d\phi_B}{dt} \quad (I.8)$$

Le signe négatif qui apparaît dans la loi de Faraday a une signification tout à fait générale : le courant produit par la variation de flux produit à son tour un flux magnétique dont la valeur a tendance à s'opposer à la variation de flux qui le produit. C'est la loi de Lenz.

### I.6.2.3 Formule de BOUCHEROT

Par hypothèse on néglige : l'influence de la résistance r des enroulements (r.i = 0),

Ainsi que l'influence de l'inductance de fuite l (l.  $\frac{di}{dt} = 0$ ). Donc :

$$u = n. \frac{d\phi}{dt} \quad (I.9)$$

Si la tension d'entrée u est sinusoïdale :

$$u = U_{\text{eff}}. \sqrt{2}. \sin \omega t \quad (I.10)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{u}{n} = \frac{U_{\text{eff}}. \sqrt{2}}{n} \sin \omega t \quad (I.11)$$

Donc :

$$\phi = \frac{U_{\text{eff}}. \sqrt{2}}{n. \omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (I.12)$$

On constate que :

- le flux est sinusoïdal ;
- Le flux dépend de la tension  $u$  , mais pas du courant  $i$  ;

### I.6.2.4 Actions magnétiques : Lois de Lorenz et Laplace

#### I.6.2.4.1 Lien induction-mouvement : Loi de Lorenz

La force  $\vec{F}$  s'exerçant sur une charge électrique  $q$  se déplaçant à la vitesse  $\vec{V}$  dans un champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  s'exprime par :

$$\vec{F} = q(\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.13})$$

#### I.6.2.4.2 Lien induction courant : Loi de Laplace

Un élément de circuit  $dl$  placé dans un champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  , parcouru par un courant  $i$  , est soumis à une force :

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (\text{I.14})$$

Cette relation est obtenue en exprimant la variation de la charge  $dq$  dans l'élément de conducteur.

### I.6.3 Milieux magnétiques isotropes

#### I.6.3.1 Relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ et le champ d'excitation $\vec{H}$

Dans un milieu magnétique quelconque mais isotrope, les vecteurs  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  restent colinéaires. Cependant, le coefficient de proportionnalité dépend du matériau.

On définit le vecteur aimantation  $\vec{J}$  qui indique l'influence du milieu. Les champs d'excitation et aimantation se superposent pour exprimer le champ d'induction :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{J} \quad (\text{I.15})$$

Or l'aimantation est proportionnelle au champ d'excitation, si bien que :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (\text{I.16})$$

$\chi$  : est la susceptibilité magnétique du matériau (sans unité).

Il en résulte une nouvelle expression liant  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  :

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (I.17)$$

$\mu$  : Perméabilité absolue [H/m]

$\mu_r$ : Perméabilité relative du matériau.

### **I.6.3.2 Classification des matériaux d'un point de vue magnétique**

#### **a) Matériaux diamagnétiques**

Matériaux qui ne comportent que des atomes non magnétiques, aimantation induite par le champ qui disparaît lorsque celui-ci est nul.

Origine de ce magnétisme induit : modification du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ appliqué.

Aimantation macroscopique colinéaire au champ exciteur mais de sens opposé. Le courant induit sous l'action du champ extérieur crée un champ qui s'oppose au champ extérieur.

Aimantation et champ exciteur faiblement proportionnels (comportement linéaire,  $\chi < 0$  et faible).

$\chi$  indépendante de la température, tous les corps sont diamagnétiques, mais ce phénomène est peu important et n'est visible que si les atomes ou molécules ne possèdent pas de moment magnétique individuel intrinsèque qui masquerait l'effet.

#### **b) Matériaux paramagnétiques**

Les atomes portent un moment magnétique permanent dont l'orientation est aléatoire. Les distances interatomiques ou intermoléculaires sont suffisamment importantes pour que les moments n'exercent aucune interaction mutuelle.

- en l'absence de champ extérieur, ils ne sont soumis qu'à l'agitation thermique et l'aimantation globale est nulle sous l'effet d'un champ magnétique, l'orientation moyenne des moments change sous l'effet du couple qui les ramène suivant la direction et le sens du champ.
- apparition d'une aimantation induite parallèle au champ, champ et aimantation de même sens ( $\chi > 0$  et faible mais  $\sim 10$  à  $1000$  fois plus grande que pour les matériaux diamagnétiques).

$\chi$  décroît avec la température car l'agitation thermique qui gêne l'orientation des dipôles suivant le champ croît.

**c) Matériaux ferromagnétiques**

Le ferromagnétisme est la propriété que possède les matériaux qui, en présence d'un champ magnétique, seront fortement attirés et possèdent a leurs tour la facilité d'aimanter.

En présence d'une excitation magnétique, les matériaux ferromagnétiques acquièrent une aimantation.

Les atomes ou molécules possèdent chacun un moment magnétique individuel et ils sont en interaction avec leurs plus proches voisins.

=> Alignement collectif sur des domaines de l'ordre du micromètre.

Existence de domaines spontanément aimantés : domaines de Weiss, Mais direction de l'aimantation variable d'un domaine à l'autre du fait de l'agitation thermique.

=> Aimantation totale nulle et modification des domaines sous l'effet d'un champ magnétique.

=> Apparition d'une aimantation induite parallèle au champ et aimantation de même sens ( $\chi > 0$  et élevée).

$\chi$  décroît avec la température car l'agitation thermique croît.

Si on supprime le champ, les domaines reprennent partiellement leur indépendance, mais les interactions magnéto cristallines résiduelles font que les moments de chaque domaine restent partiellement alignés sur le champ initial.

=>aimantation rémanente, qui disparaît si la température augmente ou si on applique un nouveau champ de sens opposé.

**I.6.4 Polarisation des matériaux ferromagnétiques****I.6.4.1 Organisation en domaines : Domaine de Weiss**

Domaine de Weiss : au niveau de chaque atome, un moment magnétique apparaît :

$$\vec{M} = M \vec{n} \quad (I.18)$$

Un domaine de Weiss est une région où tous les moments magnétiques sont identiques.

**❖ Paroi de Bloch**

Lors du transit d'un domaine de Weiss à un autre, les moments magnétiques changent de direction dans les parois de Bloch pour atteindre celle du nouveau domaine, comme indiqué sur la figure.

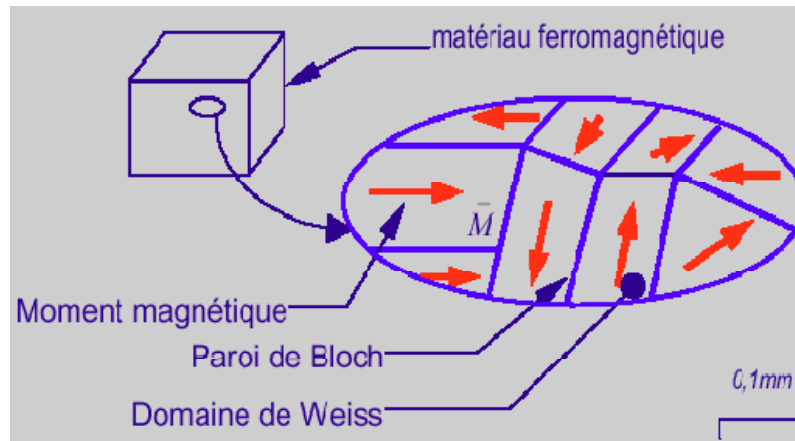


Figure I.5 domaines magnétiques

### I.6.4.2 Courbe de première aimantation

Le matériau est initialement démagnétisé (pas d'aimantation). On fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé le matériau. La courbe de la figure représente l'induction  $\vec{B}$ . On distingue trois zones : la première, linéaire, le coude de saturation et la zone de saturation.

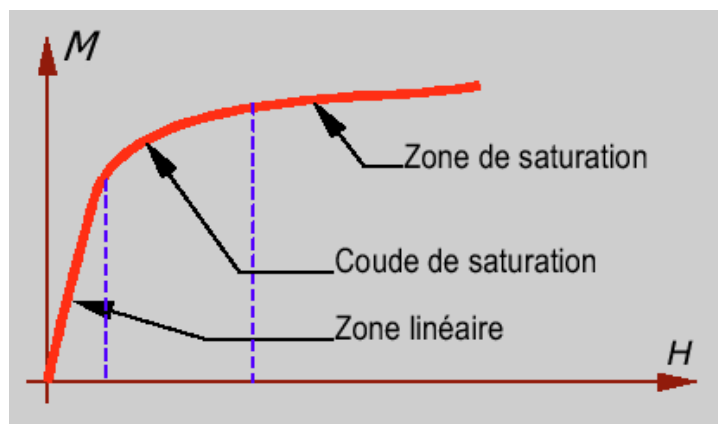


Figure I.6 courbe de première aimantation

- **Zone linéaire** dans cette zone,  $B = \mu \cdot H$  avec  $\mu$  constante C'est cette zone qui est généralement exploitée pour les transformateurs et les machines tournantes.
- **Saturation du milieu ferromagnétique** lorsque  $H$  devient trop grand,  $B$  ne varie Presque plus. Le matériau magnétique est dit saturé. On a toujours  $B = \mu \cdot H$  mais  $\mu$  n'est plus constant (il s'écroule)  $B$  tend vers le champ de saturation  $M_s$ .

### I.7 Le phénomène de magnétostriction

Les équipements électriques ont été utilisés de façon de plus en plus intensive, et cette tendance semble loin de s'inverser. Leur domaine d'application est extrêmement vaste, puisqu'ils permettent la génération, la transmission et l'utilisation de l'énergie électrique. La quantité et la diversité de ces applications, associées à des besoins énergétiques en forte augmentation à travers le monde, expliquent l'intérêt suscité par les machines électriques.

Les matériaux ferromagnétiques sont les principaux éléments constitutifs des circuits magnétiques de machines électriques. Les éléments ferromagnétiques sont le fer, le cobalt, le nickel et quelques terres rares.

Le problème du comportement des matériaux magnétostrictifs porte sur deux points :

- Le premier est l'effet de l'application d'une sollicitation mécanique sur le comportement magnétique. On sait en effet que l'application d'une contrainte conduit à une modification des propriétés magnétiques, souvent associée à une baisse du rendement.
- Le second point est l'étude de la déformation de magnétostriction que l'on sait être l'une des sources du bruit émis par les machines électriques et en particulier les transformateurs. Cette déformation est la déformation spontanée induite dans les matériaux ferromagnétiques par la présence d'un champ magnétique. [3]

Notre étude ici concerne donc les couplages magnéto-élastiques, que ce soit l'effet des contraintes sur le comportement magnétique ou l'effet du champ magnétique sur l'état de déformation.

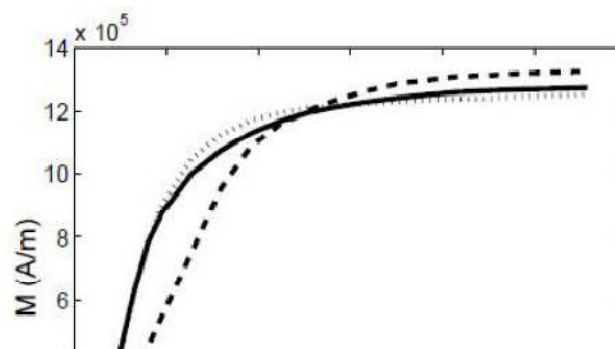
#### a) Effet d'une contrainte sur le comportement magnétique [1]

Le phénomène symétrique de la déformation de magnétostriction est l'effet des contraintes sur le comportement magnétique.

En effet, l'application d'une contrainte modifie considérablement le comportement magnétique. Ainsi, dans le cas du Nickel, une contrainte de compression uni axiale de 70 MPa multiplie par deux la perméabilité initiale (pente à l'origine de la courbe  $\vec{B}(\vec{H})$ ) et une traction uni axiale du même niveau la divise par 10 [44].

L'effet d'une contrainte uni axiale est inverse dans le cas du permalloy-68 (68% Ni-Fe). Le comportement du fer est plus complexe (figure I.7).

Une contrainte de traction entraîne une augmentation de la perméabilité pour des champs magnétiques faibles, mais une chute pour des niveaux de champ magnétique plus élevés. Ce phénomène est appelé effet Villari. Une contrainte de compression conduit en revanche généralement à une chute de la perméabilité.



**Figure I.7 Effet des contraintes sur l'aimantation d'un polycristal de fer [43],[1]**

Dans tous les cas, l'influence sur le comportement magnétique de l'application d'une contrainte n'est pas symétrique en traction et compression. L'apparition de plasticité conduit à une dégradation encore plus nette des propriétés magnétiques [43].

**b) Contraintes subies par les transformateurs [4]**

Les transformateurs sont soumis à plusieurs contraintes résultant d'actions physiques ou chimiques. Les contraintes normales entraînent une usure et un vieillissement lent du matériel. Les contraintes anormales provoquent un vieillissement prématuré ou destruction immédiate du matériel comme elles posent divers problèmes dans la réalisation des transformateurs, elles peuvent être classées en plusieurs catégories [22] :

**▪ Contraintes diélectriques**

Amorçage entre enroulements ou entre parties sous tension et entre pièce active et masse.

Lorsque le gradient du potentiel électrique appliqué à un isolant est supérieur à sa rigidité diélectrique un arc suivi d'un claquage s'établit.

**▪ Contraintes électriques**

Les contraintes électriques sont dues aux surtensions et surintensités.

**▪ Contraintes électrodynamiques**

Dues aux efforts de courts-circuits internes ou externes. Elles peuvent être réduites par un choix approprié de la nature et disposition des conducteurs.

**▪ Contraintes électromagnétiques**

Les contraintes électromagnétiques sont dues aux courants de Foucault induits dans le circuit magnétique, les pièces de serrage, la cuve, .....

**▪ Contraintes mécaniques**

Les contraintes mécaniques provoquent des déformations du matériel, vibration, .....

**▪ Contraintes thermiques**

Les principales causes d'échauffement sont représentées par les pertes par effet Joule dans les enroulements du transformateur, les pertes fer dans le circuit magnétique ainsi que les pertes par conductivité dans les isolants.

**▪ Contraintes chimiques**

Les contraintes chimiques résultent de l'action conjuguée de la corrosion et de l'oxydation sur les parois du transformateur [22].

**I.8.Origines des vibrations dans les transformateurs [4]**

Les matériaux ayant des densités de flux très élevées ont le désavantage de se déformer sous l'effet du champ magnétique, ce qui conduit à une augmentation significative des vibrations et produit un bruit acoustique indésirable.

L'origine principale de ces déformations est le phénomène de magnétostriction. Cette déformation provient du réarrangement sous champ magnétique de la microstructure en domaines magnétiques constitutifs de tout matériau magnétique.

Les voies explorées pour réduire ce bruit sans nuire aux performances des systèmes sont multiples [23].

**I.8.1 Sources de bruit d'un transformateur [4]**

Les trois principales sources de bruit d'un transformateur de puissance sont :

- le noyau (effets de magnétostriction) ;
- la charge (forces électromagnétiques dans les enroulements et la structure, causées par le flux de fuite associé au courant) ;
- les auxiliaires de refroidissement (ventilateurs et pompes).

**➤ Bruit du noyau (magnétostriction)**

La magnétostriction désigne une légère déformation mécanique des tôles du noyau sous l'effet d'un champ magnétique. Cette déformation est indépendante du sens du flux magnétique et se produit au double de la fréquence d'alimentation. Or, la courbe de magnétostriction n'étant pas linéaire, des harmoniques de fréquence élevée de rangs pairs apparaissent à des densités de flux supérieures.

Pour des transformateurs de 50 et 60 Hz, les composantes du bruit du noyau sont donc respectivement des multiples de 100 ou 120 Hz.

Les niveaux relatifs de bruit à ces différentes composantes de fréquence varient selon le matériau et la géométrie du noyau ainsi que la densité magnétique. Ils dépendent également de l'écart entre, d'une part, les fréquences de résonance du noyau et de la cuve et, d'autre part, les fréquences d'excitation.

➤ **Bruit en charge (forces électromagnétiques)**

Le bruit en charge résulte essentiellement de l'interaction du courant de charge dans les enroulements et du flux de fuite induit par ce même courant. Sa fréquence principale est donc le double de celle de la tension d'alimentation (respectivement 100 et 120 Hz pour les transformateurs 50 et 60 Hz).

Si la teneur en harmoniques du courant de charge est importante (ex., transformateurs redresseurs), les forces électromagnétiques contiennent des harmoniques de fréquence plus élevés, source importante de bruit qui doit être prise en compte lors de l'achat du transformateur.

Le niveau sonore du courant de charge est étroitement lié à la charge du transformateur: en réduisant de 50 % le courant, on abaisse le bruit en charge de 12 dB.

➤ **Auxiliaires de refroidissement**

Le bruit du ventilateur présente des caractéristiques fréquentielles différentes de celles du noyau et des enroulements du transformateur. Il ne possède pas de tonalités discrètes mais couvre une large bande de fréquences, avec un pic à la fréquence de passage des aubes mobiles devant des obstacles fixes dans l'écoulement d'air et parfois au double de cette fréquence. Les pompes produisent aussi un bruit à large bande qui contribue au bruit total du transformateur [23].

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art lié au phénomène de magnétostriction, suivie d'un fondement théorique de façon générale du magnétisme, pour ensuite s'étaler sur la présentation des phénomènes couplés magnéto-élastiques.

Pour clôturer le chapitre, nous nous sommes intéressés aux origines de vibration et sources de bruit dans des transformateurs, ainsi que les différentes contraintes subies par ces machines statiques cités et expliquées brièvement.

**II.1 Introduction**

La production et la distribution de l'énergie se réalisait autrefois sous une tension commune en courant continu à basse tension. De ce fait, elle était produite à l'endroit où elle était consommée. Puis les besoins augmentent, on constata que le transport d'électricité à basse tension présentait beaucoup de pertes de puissance sur de distances importantes, il est arrivé un moment où ce mode de production et de distribution n'a plus été adapté à la demande.

Il fallut alors opter pour une technique qui éliminera ces contraintes, qui n'est d'autre qu'une machine statique appelée transformateur.

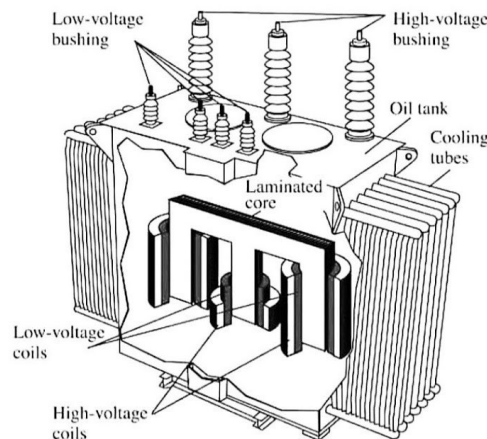
Ces machines sont fiables et très peu exigeants en maintenance, parce qu'elles ne comportent pas de pièces en mouvement continu.

**II.2 Définition d'un transformateur**

Un transformateur est un « appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » selon la Commission Electrotechnique Internationale (CEI). [1], [5]

La définition d'appareil statique pour le transformateur implique une absence de mouvement a l'opposé d'une machine tournante dotée d'un rotor mobile. Cette machine transforme l'énergie, elle ne modifie pas la nature de cette dernière alors que les machines tournantes réalisent une conversion électromécanique.

Le transformateur consomme et produit de l'énergie électrique alternative.il ne fonctionne pas en régime continu.



**Figure II.1 Transformateur triphasé de puissance [6]**

### II.3 Symbole d'un transformateur

Différentes symboles existent selon les types des transformateurs.

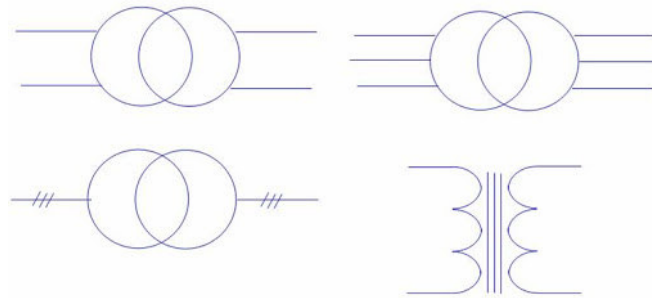


Figure II.2 Symboles de transformateurs monophasés et triphasés

#### ▪ Rapport de transformation

Le rapport de transformation  $K$  d'un transformateur représente le rapport des nombres de spires des enroulements secondaire et primaire, et également le rapport des deux tensions.

$$K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

Où  $N_1$  et  $N_2$  représentent le nombre de spires des deux enroulements primaires et secondaires,  $V_2$  et  $V_1$  leurs tensions respectivement.

### II.4 Principe de fonctionnement [2]

Les enroulements primaire et secondaire sont couplés magnétiquement de façon très serrée grâce au circuit magnétique à faible réluctance, qui assure une bonne canalisation des lignes de champ.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée.

Ce flux induit dans l'enroulement secondaire, une tension (fém. induite) proportionnelle aux nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation d'un courant secondaire.

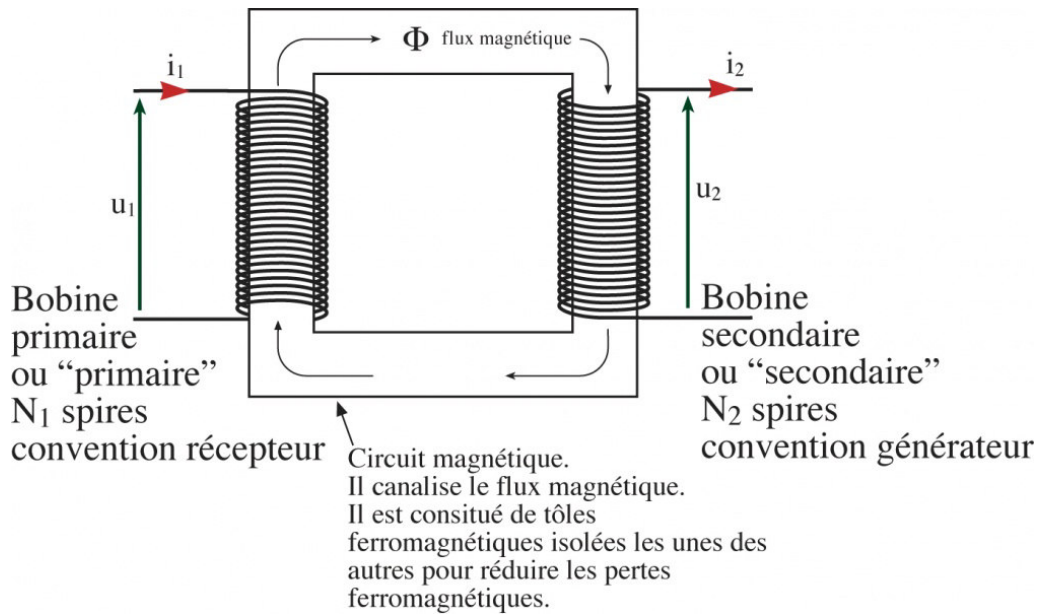


Figure II.3 Schéma de principe d'un transformateur monophasé [2]

## II.5 Constitution d'un transformateur

Le transformateur est composé d'un ou plusieurs enroulements embobinés autour d'un noyau ferromagnétique commun à base de tôles magnétiques feuilletées. Ces enroulements sont isolés électriquement mais dépendants magnétiquement, ils sont reliés par un flux magnétique commun confiné dans le noyau. Les transformateurs sont généralement monophasés ou triphasés.

Tout transformateur est constitué essentiellement de deux parties : partie active et partie constructive.

### 1. Partie active

Elle est composée principalement de trois éléments (circuit magnétique, enroulements, isolants).

#### a. Circuit magnétique [7]

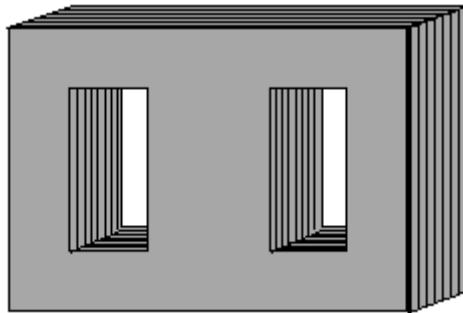
Le circuit magnétique est généralement constitué d'un empilage de tôles fines disposées dans un même plan, perpendiculairement et parallèlement les unes aux autres, permettant ainsi d'obtenir une carcasse de la forme désirée.

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique, mais elle sert aussi comme support aux enroulements. Ce circuit magnétique comporte trois colonnes dont deux sont nommées latérales et une centrale réunies par deux culasses.

Pour une meilleure efficacité, la tôle magnétique doit :

- Isoler les tôles d'acier pour diminuer les courants de Foucault.
  - Pour une fréquence de 50hz, l'épaisseur des tôles est de 0.3 mm avec une isolation de Carlitte, matière de base de phosphate.
  - Ses tôles à grains orientés sont laminées à froid dans le sens du laminage.
- Notons que les circuits magnétiques sont de deux types principaux :

1. **A colonnes** : dont lesquels les enroulements entourent les colonnes du noyau.
2. **A cuirassés** : dont lesquels les enroulements sont partiellement entourés par le noyau. Il présente trois colonnes et deux culasses.



**Figure II.4 Circuit magnétique [2]**

➤ **Réalisation [7]**

Elle se fait suivant cinq phases :

**1<sup>ère</sup> phase : Découpage**

La tôle est livrée sous forme de rouleaux de 800mm de largeur, et d'un diamètre axiale convenant au porte rouleau de la machine automatique programmable, qui assure le découpage de ce rouleau en plusieurs largeurs qui constituent le noyau tout en le rembobinant sur lui-même.

**2<sup>ème</sup> phase : Réalisation des tôles de la culasse**

La machine effectue simultanément :

- Deux trous de 200mm pour les transformateurs de puissance allant de 205 à 630 KVA, et de 300mm pour ceux de puissance supérieure à 630KVA qui sont poinçonnées à l'axe longitudinal de la culasse.
- Réaliser une coupe ou un dégagement sous forme de(V) formant un angle de 90°.
- Réaliser une coupe de 45° sur chaque extrémité.

**3<sup>ème</sup> phase : Réalisation des colonnes latérales**

Contrairement à la culasse, elle s'effectue alternativement en subissant une seule coupe sur chaque extrémité, d'un angle de 45°.

**4<sup>ème</sup> phase : Réalisation des tôles de la colonne centrale**

Elles sont réalisées alternativement, subissant sur leurs extrémités deux coupes à 45° de chaque côté, il en résulte une forme d'une flèche, d'un angle de 90°.

**5<sup>ème</sup> phase : Montage du noyau****5.1 : Mise en place du gabarit d'empilage**

C'est une table d'empilage munie d'un dispositif qui sert à maintenir la tôle de serrage et centrer les tôles de la culasse inférieure à l'aide de deux tiges de guidage.

**5.2 : Empilage du noyau**

Il s'agit d'empiler les tôles de la culasse inférieure deux par deux sur la tôle de serrage ; Puis enchevêtrer les tôles de la colonne entre celles de la culasse.

Une fois l'empilage terminé, on place sur la dernière tôle de la culasse une autre isolante sur laquelle est placée la deuxième tôle de serrage.

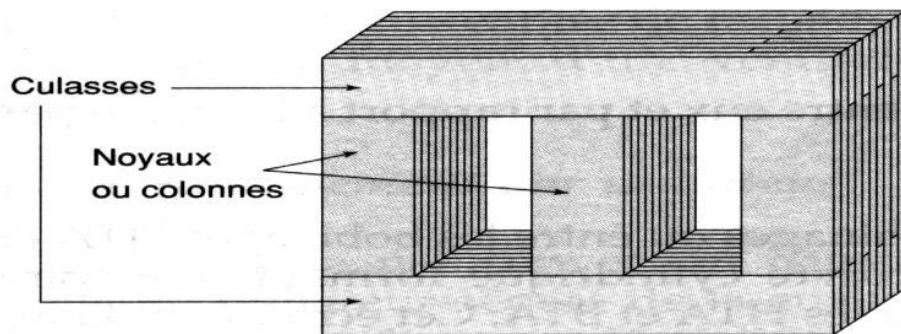
**5.3 : Serrage et renforcement de l'isolation**

Les deux tôles de serrage sont serrées à l'aide de quatre gougeons avec un isolement qui se fait sur la partie qui traverse la culasse par des tubes en PSP ou bakelisé.

Les écrous de ces gougeons sont isolés par rapport aux tôles de serrage grâce à des rondelles isolantes en PSP en caoutchouc.

**5.4 : Mise en place du châssis**

Les châssis sont placés sur les tôles de serrage et pour éviter le déplacement des tôles et toute sollicitation mécanique (fléchage), elles sont serrées à l'aide d'un fil plat qui s'enlèvera lors du montage des bobines.



**Figure II.5 Réalisation du circuit magnétique**

- **Remarque**

A l'exception de la culasse supérieure, qui ne sera montée qu'après le montage des bobines sur les colonnes.

**b. Enroulements [7]**

Ils sont réalisés à partir de conducteurs en cuivre ou en aluminium de section circulaire ou rectangulaire.

Ils sont isolés entre eux avec un vernis synthétique ou papier guipé qui résiste à la chaleur et à l'huile (psp 30-50...selon la norme).

Permettent le transfert de la puissance du primaire vers le secondaire (tertiaire) tout en modifiant la tension. Ces deux enroulements ont toujours un nombre de spire différent répartie dans plusieurs galettes en série, La section de la spire est constituée de plusieurs fils (leurs nombres et leurs dimensions dépendent de la valeur du courant).

➤ **Réalisation [7]**

Elle se fait par cinq étapes principales :

**a) Mise en place du gabarit :**

- Tube en papier bakelisé (pour la BT)
- Rondelles latérales (pour la BT avec embouts).

**b) Bobinages**

**Emplacement** Selon l'emplacement des enroulements sur les colonnes on distingue :

✓ **Bobinage concentrique (en tonneau)**

L'enroulement BT est placé près de la colonne car la distance d'isolation entre la bobine et la colonne sera la plus faible.

✓ **Bobinage mixte**

Pour éviter les très fortes ddp entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montées en série les unes avec les autres. Utilisé surtout en HT et THT.

✓ **Bobinage alterné en galettes**

Les galettes MT et BT sont alternées, l'empilage est terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique.

**c) Renforcement d'isolation**

Les enroulements sont renforcé avec un papier Psp de 0.105mm et de 0.2mm sur les extrémités pour la BT et sur les premières couches pour la HT.

Renforcement avec Pfg qui se fait par un recouvrement de 50% pour la HT.

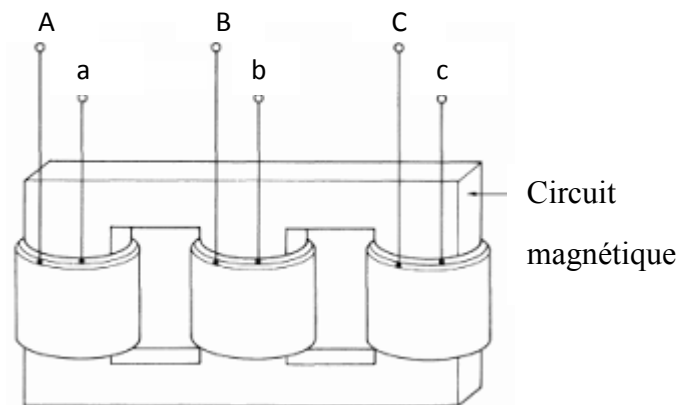
**d) Séchage**

Tous les enroulements subissent une étape de séchage sous vide et a une température de 120 degré Celsius pendant une durée de 12 heures afin d'éviter un court circuit lors du fonctionnement.

**e) Pressage**

Les bobines ayant subi un séchage doivent obligatoirement passer sur une presse pour ajuster la longueur puis les classer selon leurs largeurs.

Il est à noter qu'on achevant le bobinage HT on fait ressortir les prises respectivement sur les trois dernières couches.



**Figure II.6 Réalisation des enroulements [8]**

**C. Isolants**

A l'intérieur d'un transformateur de puissance on trouve deux types d'isolants : Isolant solide à base de cellulose (isolations entre spires, entre enroulements, entre enroulements et masse.....) Isolation liquide (huile) en remplaçant tous les espaces d'air par l'huile.

**• Isolation**

On distingue l'isolation principale et longitudinale.

L'isolation principale comprend : l'isolation entre bobinage, entre bobine et circuit magnétique et entre bobine et bac. Elle est assurée par de l'huile et des écrans (cartons isolants).Le bac étant rempli d'huile.

L'isolation longitudinale comprend l'isolation entre spires et entre couches d'une même bobine.

**• Accessoires**

**✓ Ecran de sécurité**

C'est une spire ouverte d'une bande de cuivre reliée à la masse, placée entre l'enroulement HT et BT. Cet écran peut jouer le rôle d'écran électrostatique en empêchant la transmission des parasites de HT vers BT. Elle doit être reliée à la terre.

**✓ Traversée isolante**

Elles assurent les liaisons électriques entre les enroulements et les circuits électriques extérieurs .C'est une borne isolante qui doit permettre :

- L'isolement de la liaison par rapport au couvercle
- D'assurer l'étanchéité de la liaison.
- De posséder une résistance mécanique suffisante.

**• Refroidissement**

Il existe différents modes de refroidissement : Les pertes par effet Joule dans les enroulements, par hystérésis et courants de Foucault dans le circuit magnétique provoquent l'échauffement.

**2. Partie constructive [7]****a) La cuve**

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans de l'huile, Sa construction est liée au calcul thermique du transformateur et destinée à satisfaire les exigences suivantes :

- Une bonne résistance mécanique et rigidité nécessaire pour éviter la déformation sous l'effet du poids de la partie active et de l'huile qui s'exerce sur elle.  
La forme ovale de la cuve installée sur un chariot avec galets est alors celle convenue.
- Réalisée avec une grande surface d'échange de chaleur avec l'extérieur.

**➤ Réalisation [7]**

La construction de la cuve est subdivisée en quatre phases :

**1<sup>ère</sup> phase : Construction des parois ondulées**

- Emplacement du rouleau sur la machine qui réalise les ondulations.
- Pliage de la tôle en forme d'ondulations.
- Soudage avec baguettes d'écartement des ondulations de profondeurs supérieures ou égales à 200mm.
- Renforcement du soudage en utilisant des lames pour la facette interne et du fer pour la facette externe.

**• Remarque**

Le matériau utilisé pour la construction est le ST 37.2, d'une épaisseur de 1.2mm, sous forme d'un rouleau de largeur variante suivant le type de transformateur.

**2<sup>ème</sup> phase : Construction de la partie inférieure**

Les tôles sont découpées à l'aide d'une machine qui cisaille suivant les dimensions du transformateur pour obtenir tout le constituant de la partie inférieure qui est composée d'une base, de deux parties latérales et du support.

**2.1 : La base**

A l'aide d'une machine plieuse, la tôle subit l'opération en largeur de 90° et de hauteur demandée, qui se fait après le découpage.

**2.2 : Les parties latérales**

L'une des deux parties est poinçonnée avec une machine à plusieurs positions.

**2.3 : Le support**

Sur cet élément, on réalise quatre trous dont deux sont réservés pour recevoir les galets et les autres pour le maintien à l'assemblage.

**2.4 : Montage de la partie inférieure**

- L'assemblage des éléments de la partie inférieure est obtenu par une opération de soudage.
- Des tiges de guidage sont soudées à l'intérieur de la partie inférieure en vue d'immobilisation de la partie active du transformateur.
- Un dispositif est fait pour permettre de recevoir le fil de la mise à la terre.

**• Remarque**

Le matériau utilisé est l'acier plat de 3 à 6mm d'épaisseur suivant le type de transformateur.

**2.5 : Le sablage**

Il consiste à enlever toute rouille à injection sous pression d'un simple dit « grenaille » de type 0.9 à 1mm.

**2.6 : Le dressage**

Il s'agit d'éliminer toutes les bavures et redresser toutes les déformations causées lors de la soudure ou du sablage.

**3<sup>ème</sup> phase : Construction du cadre (partie supérieure)**

Il se situe entre les parois ondulées et le couvercle, sa fonction dépend du type de transformateur. Il est réalisé comme suit :

- Découpage des barres.
- Soudage des extrémités.
- Sablage et dressage.
- Pressage en réalisant les trous de fixation du couvercle sur la cuve.

**• Remarque**

Le matériau constituant le cadre est de l'acier doux arrivant sous forme de profilés (cornières). [7]

**4<sup>ème</sup> phase : Montage de la cuve**

Ce montage se fait suivant ces étapes :

- Rassemblement de tous les éléments qui constituent la cuve au poste de montage.
- Montage et fixation des éléments avec des pinces à étaux.
- Vérification de l'équerrage des parois ondulées.
- Contrôle du cadre (niveau).
- Application de la soudure.
- Contrôle de l'étanchéité de soudure avec une huile fluorescente dite « liquide de pénétration » pendant un temps déterminé.
- Détection des défauts à l'aide d'une lampe à rayons ultraviolets.
- Correction des soudures au chalumeau.
- Application de la peinture (couche d'antirouille).
- Après séchage, c'est le montage et fixation des galets sur le support.

**b) Le couvercle**

C'est un élément important de la cuve ; il représente la partie supérieure du transformateur, sur lequel sont disposés plusieurs éléments (bornes HT et BT, pattes de suspension...Etc.)

**➤ Réalisation [7]**

La construction du couvercle se fait comme suit :

- Découpage de la tôle du couvercle sous forme du rectangle aux dimensions voulues.
- Poinçonnage des ouvertures nécessaires sur le couvercle, tels que :
  - 03 ouvertures pour l'emplacement des isolateurs HT.
  - 04 ouvertures pour l'emplacement des traversées BT.
  - 02 ouvertures pour l'emplacement des poches thermomètre.
  - 01 ouverture pour l'emplacement de la tuyauterie reliant le conservateur d'huile et la cuve à travers le couvercle.
  - 01 ouverture pour l'emplacement de la manette de réglage.
  - 01 ouverture pour la fixation du couvercle sur la cuve.
  - 02 ouvertures pour les éclisses (supports).
- Soudage des pièces suivantes :
  - Les deux crochets de levage (oscillés de levage).
  - Les deux cornières d'appui du couvercle.
  - Les trois brides HT pour permettre la fixation des isolateurs.
  - La prise de terre.
  - Les trois dispositifs pour permettre la fixation des éclateurs qui sont du côté HT.
  - Les deux dispositifs pour permettre la fixation du curseur de réglage de la tension.
- Le sablage et le dressage.
- La prescription des symboles et des chiffres sur le couvercle désignant les bornes HT (A.B.C), BT (a.b.c) et le neutre (n), ainsi que les symboles de la prise de terre et leurs trois positions du commutateur de réglage.

- **Remarque**

Le matériau utilisé est l'acier doux plat de 4mm d'épaisseur, livré sous forme de paquets de tôles de dimensions variables. [7]

**c) Le conservateur d'huile**

Il est fixé sur le couvercle à l'aide des éclisses et sur sa face frontale est placé un indicateur d'huile transparent sur l'autre face une bride est soudée sur laquelle l'assécheur d'air est fixé.

**➤ Réalisation [7]**

La construction est répartie en trois phases comme suit :

**1<sup>ère</sup> phase : Réalisation des deux tôles de fond**

- Découpage et cisaillement des tôles en leurs donnant une forme circulaire.
- Formation des bordages sur machine.

**2<sup>ème</sup> phase : Réalisation de la tôle d'enveloppe**

- Découpage de la tôle de l'enveloppe sur une longueur et une largeur normalisées.
- Réaliser les ouvertures telles que :
  - Le trou pour l'emplacement de la tuyauterie.
  - Les deux trous pour l'emplacement de l'indicateur de niveau.
  - Le trou pour l'emplacement de l'assécheur d'air.
- Réalisation d'une forme cylindrique pour l'enveloppe avant la soudure définitive.
- Application de la soudure par pointe.
- Application de la soudure définitive.

**3<sup>ème</sup> phase : Montage du conservateur d'huile**

- Soudage des tôles de fond de part et d'autre du cylindre et tuyauterie.
- Soudage du conservateur au couvercle par deux tiges (éclisses).
- Application de la couche d'antirouille.

**d) Isolateurs et traversées**

Les enroulements sont reliés au circuit extérieur par des bornes qui permettent le passage des conducteurs à travers le couvercle.

L'augmentation de la tension des réseaux conduit à augmenter la longueur de ces bornes afin d'obtenir une bonne isolation.

**II.6 Pertes magnétiques dans le transformateur [2]**

On sait que toute variation d'induction dans un matériau magnétique implique à l'intérieur de celui-ci une dissipation apparaissant le plus souvent sous forme de chaleur non récupérable, d'où l'expression des pertes magnétiques pour désigner le phénomène. Ces

pertes sont mesurées par un appareil qui s'appelle cadre d'EPSTEIN. Les différents types de pertes magnétiques sont :

- **Les pertes fer**

La variation périodique du flux magnétique provoque des pertes d'énergie dans les tôles du circuit magnétique par courants de Foucault et par hystérésis.

- **Les pertes par courant de Foucault**

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices du courant électrique. En présence d'un flux variable, ils sont le siège de courants induits qui circulent dans la masse même de ces matériaux. L'effet Joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur appelée "pertes classiques par courants induits".

- **Les pertes par hystérésis**

Elles sont dues au travail des forces de freinage (moment magnétique) agissant sur les parois de Bloch en mouvement durant les processus d'aimantation et de désaimantation. Ces pertes correspondant au travail  $W$  nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis elles sont donné par :

$$W = \oint HdB \quad (\text{II.1})$$

Où  $H$  est le champ magnétique et  $B$  l'induction magnétique.

- **Les Pertes Joule**

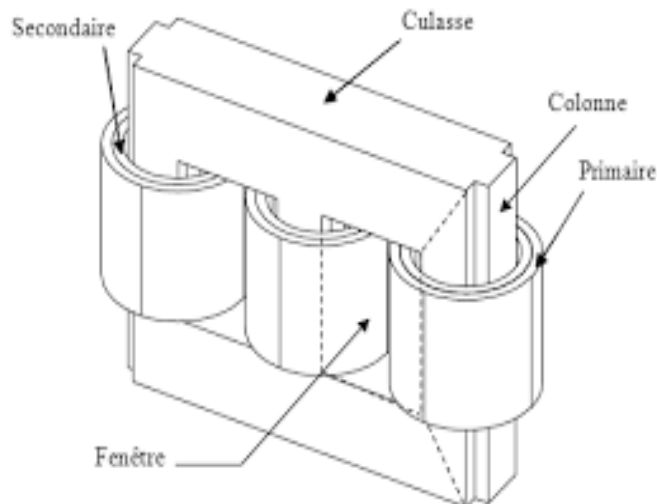
Le passage de courant dans les enroulements d'un transformateur provoque des pertes d'énergie proportionnelles à la résistivité et au volume du conducteur ainsi qu'au carré de la densité du courant. Le transformateur présente aussi des pertes dans les connexions et des pertes par effet pelliculaire.

## II.7 Types de Transformateurs

### II.7.1 Transformateur à colonnes [9]

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeux.



**Figure II.7 Transformateur a colonnes [9]**

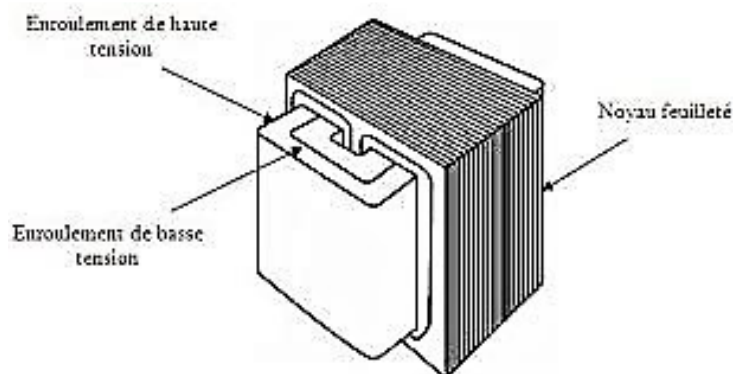
**II.7.2 Transformateur Cuirassé [10]**

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre".

La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble.

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements.

Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.



**Figure II.8 Transformateur cuirassé [9]**

Le type de transformateur peut également s'élargir suivant leurs nombreuses applications possibles. On distingue alors : [2]

✓ **Transformateur d'impédance**

Il est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge.

✓ **Transformateur de courant**

C'est un transformateur de mesure abaisseur de courant, donc éleveur de tension. On l'utilise notamment pour mesurer l'intensité d'un courant fort, le primaire pouvant alors être constitué d'une seule spire. Ce type de transformateur s'utilise avec secondaire en court-circuit. Dans le cas contraire, la tension apparaissant au secondaire pourrait être très élevée.

✓ **Transformateur de tension**

Ce transformateur est utilisé pour mesurer des tensions alternatives élevées.

✓ **Transformateur d'isolement**

Il est utilisé pour assurer une isolation galvanique entre circuits. Il est essentiellement utilisé pour changer la tension des circuits auxiliaires de commande et de contrôle des circuits d'éclairage.

✓ **Transformateur d'impulsions**

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande de gâchettes des thyristors et des triacs.

✓ **Autotransformateurs**

Il s'agit de transformateurs sans isolement entre le primaire et le secondaire. Le secondaire est une partie de l'enroulement primaire, c'est-à-dire que le primaire et le secondaire sont directement connectés ce qui présente des risques du point de vue de la sécurité des personnes.

✓ **Transformateur triphasé de puissance**

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser trois transformateurs monophasés, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) est généralisée. Cette solution permet la conception de transformateurs bien moins coûteux. [1]

## **II.8 Différents modes de couplages [11]**

L'association d'un mode de connexion du primaire avec un mode de connexion du secondaire caractérise un couplage.

Les enroulements primaires d'un transformateur peuvent être reliés : En étoile, symbole Y  
En triangle, symbole D.

Les enroulements secondaires d'un transformateur peuvent être reliés : En étoile, symbole Y  
En triangle, symbole D , En zig-zig, symbole Z.

Si le point neutre des enroulements en étoile ou en zigzag est accessible pour être raccordé, les désignations deviennent YN ou ZN et yn et zn.

**II.8.1 Choix des couplages**

Les enroulements sont couplés au choix en étoile(Y) ou en triangle ou en zigzag.

**II.8.1.1 Connexion étoile**

Dans la connexion étoile chaque enroulement de phase d'un transformateur triphasé est connecté à un point commun (point neutre) qui peut être mis ou pas à la terre.

L'autre extrémité étant reliée à la borne de ligne correspondante. La tension aux bornes des bobines est la tension entre phases divisée par  $\sqrt{3}$ , le courant traversant les bobines est le courant de ligne.

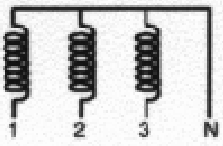
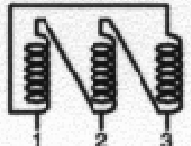
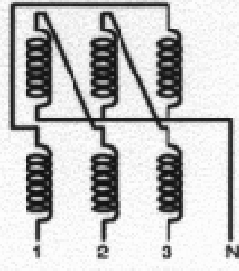



**II.8.1.2 Connexion triangle**

Dans la connexion triangle, la connexion des enroulements des phases d'un transformateur triphasé est effectuée de façon à réaliser un circuit fermé.

La tension aux bornes des bobines est la tension entre phases .Le courant traversant les bobines est le courant de ligne divisé par  $\sqrt{3}$ .

**II.8.1.3 Connexion zigzag**

Connexion de chaque enroulement consistant en deux sections, la première section étant connectée en étoile et la seconde étant disposée en série entre la première section et les bornes de lignes. Ce type de connexion admet donc à mettre en série, deux demi-enroulements, pour constituer une phase.

Branchement (ou montage)	Etoile	Triangle	Zigzag
Schéma			
Symbole			
Lettre	Y ou y	D ou d	Z ou z
Remarques	Simple, robuste et adapté aux très hautes tensions	Plus adapté aux courants importants	Utilisé côté secondaire des transformateurs de distribution Connexions plus nombreuses

**Figure II.9 Différents modes de couplage[4]**

## **II.9 Défauts d'un transformateur [10]**

Les principaux défauts intervenants dans le fonctionnement d'un transformateur de puissance sont :

- **Défauts liés à la fabrication**

- Le mélange des impuretés dans l'alliage constituant le circuit magnétique.
- Le non isolement des conducteurs des enroulements primaire ou secondaire.
- Mauvaise étanchéité au niveau des bornes HT ou BT. Un tel défaut peut provoquer une fuite d'huile. En effet, le sur échauffement du bobinage.

- **Défauts d'ordre mécanique**

- Déformation du circuit magnétique.

- **Défauts liés aux conditions de transport**

- Percement de la cuve qui provoque les fuites d'huile.
- Les fissures ou les cassures des isolateurs des bornes HT /BT.
- Le mauvais serrage des connections HT/BT provoque leurs échauffement. Ainsi les risques des courts circuits.

- **Défauts d'ordre atmosphérique**

- L'humidité.
- La chaleur excessive.
- Les foudres.

- **Défaut d'ordre électrique**

Un tel défaut peut résulter d'un court-circuit ou d'un circuit ouvert au niveau du bobinage primaire ou secondaire.

Un court-circuit provoque une augmentation de la température à l'intérieur de transformateur, ce qui conduit à la détérioration des isolants des conducteurs. Le transformateur est donc déséquilibré.

- Les surtensions suite aux mauvais contacts.
- Les manques de phases de la source HT.
- Les surcharges des transformateurs de puissances.
- Le déséquilibre des charges sur les trois phases BT.
- Court circuit entre spires.

**II.9.1 Leurs causes [10]**

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

**1. Les initiateurs de défauts**

Surchauffe du transformateur, usures des éléments des contacts, cassures des isolateurs de bornes HT,BT de fixations, problème d'isolation électrique notamment du bobinage, surtension transitoire...

**2. Les contributeurs aux défauts**

Surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défailante, humidité, mauvaise terre, vieillissement...

**3. Les défauts sous jacents et erreurs humaines**

Défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées (fusibles sur calibrés), fausses manœuvres côté HT, absence de maintenance...

Les effets sont principalement dus à un problème : thermique, électrique, et environnemental, électromagnétique.

**II.10 Conclusion**

Ce chapitre, a été consacré a la présentation générale d'un transformateur principalement les transformateurs triphasés, du fondement de son fonctionnement, son mode de couplage et ces paramètres techniques. Une explication détaillée de la constitution et des différentes étapes de réalisation de cette machine statique a été faite, et pour terminer nous avons cité les différents défauts probables que pourrait rencontrer les transformateurs provenant de diverses sources.

**III.1 Introduction**

Dans l'étude de tout phénomène physique, l'établissement des équations qui le régissent constitue la première approche du problème. Dans un premier temps nous nous attèlerons à formuler les équations qui vont nous permettre d'appréhender les phénomènes physiques ciblés dans le cadre de ce travail.

En un deuxième temps une étude est présentée qui concerne les couplages magnéto-élastiques, que ce soit l'effet des contraintes sur le comportement magnétique ou l'effet du champ magnétique sur l'état de déformations.

On peut voir que ces deux points conduisent finalement à l'étude du même problème. L'objectif consiste à établir un modèle magnéto-élastique capable de rendre compte de ces effets de couplage.

**III.2 Equation de Maxwell**

Le comportement des phénomènes électromagnétiques traités dans le domaine de la physique mathématique est résumé par l'emploi des équations de Maxwell, appelées aussi équations générales de l'électromagnétisme. Ces équations s'écrivent sous deux formes équivalentes qui sont [12] [13] :

**a) Forme différentielle des équations de Maxwell**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{III.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.4})$$

$\rho$  est la densité de charge volumique.

$\vec{D}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ , et  $\vec{H}$  sont respectivement les vecteurs déplacement, champ électrique, induction magnétique et champs magnétique.

$\vec{j}$  représente la densité de courant. Lorsque le milieu est à la fois conducteur et diélectrique l'équation précédente s'exprimera de manière détaillée par :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_C + \vec{j}_D \quad (\text{III.5})$$

$H$  est le champ magnétique.

$\vec{j}_C$  exprime la densité de courant de conduction électrique

$\vec{J}_D$  représente la densité de courant de déplacement dont l'expression est la suivante :

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{(III. 6)}$$

En introduisant (III.6) dans (III.4) l'équation (III.5) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{(III. 7)}$$

L'expression de la quatrième équation de Maxwell telle que trouvée est la forme la plus courante utilisée dans la littérature.

La nature locale des équations de Maxwell permet de prendre en compte dans les différentes équations, en fonction de la nature du milieu considéré, l'un des effets ou l'association de deux ou trois effets [13].

**b) Forme intégrale des équations de Maxwell**

La première équation de Maxwell traduit le théorème du Gauss à savoir :

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iiint_V \rho \cdot dv \quad \text{(III. 8)}$$

Ou encore :

$$\iiint_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{D}) \cdot dv = \iiint_V \rho \cdot dv \quad \text{(III. 9)}$$

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

La deuxième équation de Maxwell est donnée sous forme intégrale par :

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} (\iint \vec{B} \cdot \vec{ds}) \quad \text{(III. 10)}$$

Avec :

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad \text{(III. 11)}$$

$\Phi$  : flux magnétique traversant la section (s).

$d\vec{l}$  : élément de longueur orienté.

La troisième équation de Maxwell exprime la conservation du flux magnétique ;

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (\text{III. 12})$$

La quatrième équation de Maxwell appelée aussi loi de Maxwell-Ampère est donnée par :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i I_i \quad (\text{III. 13})$$

$I_i$  : Courant  $i$  contenu à l'intérieur du contour fermé.

A ces équations sont associées :

- **Les lois constitutives du milieu**

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{III. 14})$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{III. 15})$$

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

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

- **La loi d'Ohm**

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{III. 16})$$

$\sigma$  : Conductivité électrique du milieu [ $\Omega/m$ ].

- **L'équation de conservation de la charge**

Afin d'assurer la validité de l'équation de conservation de la charge même en régime variable, Maxwell a modifié l'équation résultant du théorème d'Ampère en lui ajoutant un terme de densité de courant appelé densité de courant de déplacement. Par la suite l'équation fournie par Maxwell est l'équation (III.7) :

Et en appliquant la divergence à l'équation (III.7) en tenant compte de l'équation (III.1) on retrouve l'équation de continuité appelée aussi l'équation de conservation de la charge ci-dessous :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{III. 17})$$

**III.3 Equation électromagnétique**

**III.3.1 Hypothèse simplificatrice**

L'équation électromagnétique à établir sera obtenue à partir des hypothèses simplificatrices, souvent utilisées lors du traitement des phénomènes électromagnétiques dans le domaine des courants forts [13], suivants :

- Les courants de déplacement sont négligeables.
- La densité de charge volumique est supposée nulle.
- Les matériaux utilisés sont à propriétés physiques isotropes.

En tenant compte des hypothèses ainsi formulées les équations de Maxwell à considérer sont :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \tag{III. 18}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{III. 19}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{III. 20}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \tag{III. 21}$$

Avec :

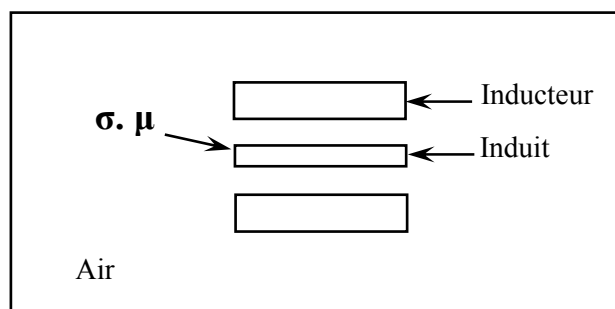
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \tag{III. 22}$$

$$\vec{J} = \vec{J}_S + \overrightarrow{J_{induit}} \tag{III. 23}$$

$$\overrightarrow{J_{induit}} = \sigma \overrightarrow{E_{induit}} + \sigma (\vec{\nabla} \wedge \vec{B}) \tag{III. 24}$$

**III.3.2 Equation électromagnétique 2D**

L'équation électromagnétique 2D est recherchée en utilisant les équations de Maxwell précédentes en tenant compte des hypothèses simplificatrices pour un système électromagnétique comportant un inducteur, un milieu induit et l'air environnant tel que représenté dans la figure ci-dessous :



**Figure III.1 Dispositif électromagnétique comportant l'inducteur, l'induit et l'air**

La résolution des équations de Maxwell associées aux lois de comportement peut être obtenue en considérant les champs comme inconnus. Néanmoins, on préfère exprimer les champs magnétiques et électriques en fonction des potentiels qui peuvent être scalaires ou vectoriels.

**III.4 Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique**

A partir du système d'équation formulé précédemment on peut déduire des équations aux dérivées partielles pour chacune des grandeurs  $\vec{H}$  et  $\vec{E}$ . Toutefois, les formulations en champ présentent un inconvénient majeur, (c'est celui de la discontinuité aux interfaces et particulièrement aux coins [12]). Pour palier à ce problème l'utilisation du potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  et du potentiel scalaire électrique  $V$  ainsi que le potentiel scalaire magnétique  $\Phi$  permet de condenser et de réduire le nombre d'inconnus [14].

L'équation (III.20) permet de déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \tag{III. 25}$$

La combinaison des équations (III.25) et (III.19) conduit à :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \tag{III. 26}$$

La relation (III.26) permet de déduire qu'il existe un potentiel électrique scalaire  $V$  tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = - \vec{\nabla} V \tag{III. 27}$$

D'où :

$$\vec{E} = - \vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{III. 28}$$

Et

$$\vec{J} = \sigma \left( - \vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$$

D'où finalement l'expression de la densité de courant de conduction suivante :

$$\vec{J} = -\sigma_{\text{inducteur}} \vec{\nabla} V - \sigma_{\text{induit}} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{III. 29}$$

Et l'équation (III.21) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma_{\text{induit}} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{III. 30})$$

C'est l'équation électromagnétique faisant intervenir le terme induit.

$\vec{J}_s$  : Densité de courant source.

L'équation (III.30) traduit le phénomène de pénétration des courants induits pour un système comportant un circuit d'excitation et un induit conducteur ou un régime transitoire d'un système électromagnétique.

### III.4.1 Equation magnétodynamique bidimensionnelle

Dans ce cas le potentiel vecteur magnétique ne comporte qu'une seule composante perpendiculaire au plan d'étude, prise comme étant la direction  $\vec{oz}$  en coordonnée cartésienne ou le long de la direction orthoradiale ( $\varphi$ ) du système cylindrique ( $r, \varphi, z$ ).

L'équation (III.30) s'exprimera comme suit :

#### a) Dans le cas 2D axisymétrique

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A\varphi}{\partial t} = -J_{s\varphi} \quad (\text{III. 31})$$

Avec :

$\nu = \frac{1}{\mu}$  réluctivité magnétique.

$$\vec{A}(0, A\varphi, 0); J_s = (0, J_{s\varphi}, 0)$$

En régime harmonique :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial z} \right) - j\sigma\omega A\varphi = -J_{s\varphi} \quad (\text{III. 32})$$

#### b) Dans le cas 2D cartésien

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial Az}{\partial t} = -J_{sz} \quad (\text{III. 33})$$

Avec :  $\nu$  reluctivité magnétique.

$$\vec{A} (0,0, Az) ; J_s = (0,0, J_{sz}).$$

En régime harmonique :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial y} \right) - j\sigma\omega Az = -J_{sz} \quad (III. 34)$$

### III.4.2 Equation magnétostatique bidimensionnelle

a) Dans le cas 2D axisymétrique

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial (rA\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu}{r} \frac{\partial (rA\varphi)}{\partial z} \right) = -J_{s\varphi} \quad (III. 35)$$

Avec :  $\nu = \frac{1}{\mu}$  reluctivité magnétique.

$$\vec{A}(0, A\varphi, 0) ; J_s = (0, J_{s\varphi}, 0).$$

b) Dans le cas 2D cartésien

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial Az}{\partial y} \right) = -J_{sz} \quad (III. 36)$$

Avec :  $\nu = \frac{1}{\mu}$  reluctivité magnétique.

$$\vec{A} (0,0, Az) ; J_s = (0,0, J_{sz}).$$

## III.5 Formulation utilisant le potentiel scalaire magnétique

### III.5.1 Potentiel scalaire magnétique total

Dans ce modèle on suppose que les courants électriques sont nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps, alors les équations (III.20) et (III.21) deviennent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III. 37})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = 0 \quad (\text{III. 38})$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié ou bien par des aimants permanents [15] [16].

Dans ce dernier cas ; on dispose de la loi de comportement ci-dessous :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III. 39})$$

Où  $\vec{B}_r$  est l'induction magnétique rémanente de l'aimant permanent.

La relation (III.38) implique qu'il existe un potentiel scalaire magnétique  $\Phi$  tel que :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\Phi \quad (\text{III. 40})$$

La combinaison de (III.37), (III.39) et (III.40) nous ramène à écrire :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla}\Phi) = \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r \quad (\text{III. 41})$$

L'équation (III.41) représente l'équation magnétostatique en terme de potentiel scalaire magnétique.

En coordonnées cartésiennes tridimensionnelles l'équation (III.41) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = \frac{\partial B_{rx}}{\partial x} + \frac{\partial B_{ry}}{\partial y} + \frac{\partial B_{rz}}{\partial z} \quad (\text{III. 42})$$

C'est l'équation magnétostatique en terme de potentiel scalaire magnétique régissant le phénomène magnétostatique en 3D.

### **III.5.2 Potentiel scalaire magnétique réduit**

La méthode utilisant le potentiel scalaire réduit est basée sur la décomposition du champ magnétique en deux parties [17] [16] :

$$\vec{H} = \vec{H}_j + \vec{H}_r \quad (\text{III. 43})$$

Pour cela le champ magnétique d'excitation, que produiraient les courants d'excitation de densité  $\vec{J}$  dans le vide,  $\vec{H}_j$  peut être calculé grâce à la formule de Biot et Savart ci-dessous [17] [16] :

$$\vec{H}_j = \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega} \left( \frac{\vec{J} \wedge \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \right) d\Omega \quad (\text{III. 44})$$

Avec :

$\vec{r}$  : vecteur reliant le point où le champ est calculé et le point source.

$\Omega$  : domaine d'étude.

Et  $H_r$  vérifiant la relation suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H}_r = 0 \quad (\text{III. 45})$$

On peut à nouveau introduire un potentiel scalaire  $\Psi$  tel que :

$$\vec{H}_r = -\vec{\nabla}\Psi \quad (\text{III. 46})$$

La combinaison de (III.46), et (III.39), dans (III.37) nous donne :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla}\Psi) = \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r \quad (\text{III. 47})$$

L'équation (III.47) traduit les phénomènes magnétiques en terme de potentiel scalaire magnétique réduit permettant de prendre compte des problèmes avec source de courant.

### III.6 Condition de passage entre deux milieux

La surface de séparation de deux milieux de propriétés physiques différentes, les champs de vecteur doivent vérifier certaines conditions dites relations de passage.

Elles s'énoncent comme suit :

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique :

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{III. 48})$$

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique :

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III. 49})$$

- Discontinuité de la composante tangentielle de champ magnétique si les courants surfaciques existent :

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{K} \tag{III. 50}$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique si les charges surfaciques existent :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \tag{III. 51}$$

- La conservation de la composante normale de la densité de courant :

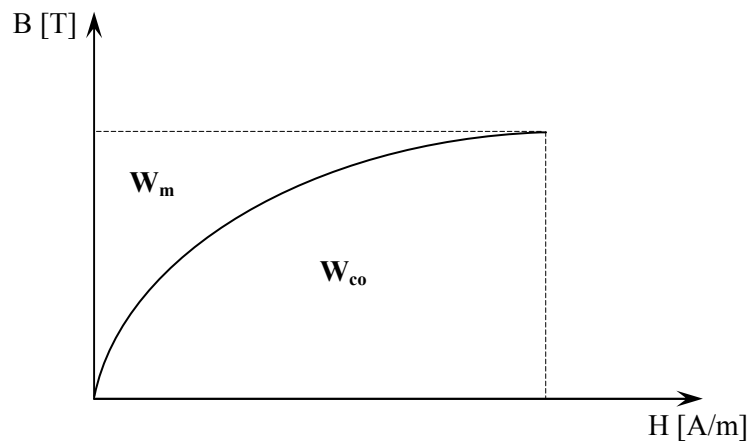
$$(\vec{J}_1 - \vec{J}_2) \cdot \vec{n} = 0 \tag{III. 52}$$

$\vec{n}$ : Vecteur normale à la surface de séparation entre les deux milieux (1) et (2).

$\vec{K}$ : Densité de courant à surface de séparation.

$\rho_s$ : Densité de charge électrique à la surface de séparation.

### III.7 Notion d'énergie et de co-énergie magnétique



**Figure III.2 Courbe de B – H**

L'énergie magnétique constitue la partie délimitée par la courbe  $B = f(H)$  et l'axe des ordonnées.

Le calcul de la force magnétique peut se faire soit à partir de la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement en maintenant le courant constant soit en utilisant la

dérivée de la co-énergie magnétique par rapport au déplacement en considérant le flux constant [13].

**a) Expression de l'énergie magnétique**

L'énergie magnétique s'obtient en utilisant la relation intégrale suivante :

$$W_m = \int_{\Omega} \left( \int_0^B H dB \right) d\Omega \tag{III.53}$$

$\Omega$  étant le domaine d'étude considéré.

**b) Expression de la co-énergie magnétique**

La relation donnant la co-énergie obtenue à partir de la courbe  $B=f(H)$  est de la forme :

$$W_{co} = \int_{\Omega} \left( \int_0^H B dH \right) d\Omega \tag{III.54}$$

**III.8 Force magnétique**

La force d'origine électromagnétique est déterminée en utilisant principalement :

- Le tenseur de Maxwell.
- Les travaux virtuels.
- L'énergie et la co-énergie magnétique.
- La force de Lorentz.

**a) Force déduite à partir du tenseur de Maxwell**

La force électromagnétique obtenue en utilisant le tenseur de Maxwell est donnée par l'expression suivante [18] [13] :

$$\vec{F} = \oiint_s \left[ (\vec{B}_n \cdot \vec{H}_t) \vec{t} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right) \vec{n} \right] ds \tag{III.55}$$

$\vec{B}_n$  : Composante normale de l'induction magnétique.

$\vec{H}_t$  : La composante tangentielle du champ magnétique.

$\vec{n}$ : est la normale extérieure à la surface d'intégration.

$\vec{t}$ : Le vecteur tangent à la même surface.

S: la surface d'intégration contenant le milieu où la force doit être calculée.

Dans le cas de la région de l'air l'expression de la force se réduit à [19] :

$$\vec{F}_{\text{air}} = \oint_S \left[ \frac{1}{\mu_0} (B_i \cdot B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2) \vec{n} \right] ds \quad (\text{III. 56})$$

$\mu_0$  : Est la perméabilité magnétique de l'air.

$\delta_{ij}$  : Est le symbole de Kronecker.

La valeur de B utilisée dans le calcul de la force à partir de l'expression (III.23) est donnée par la valeur moyenne suivante :

$$B_s = \frac{1}{2} (B_{e1} + B_{e2}) \quad (\text{III. 57})$$

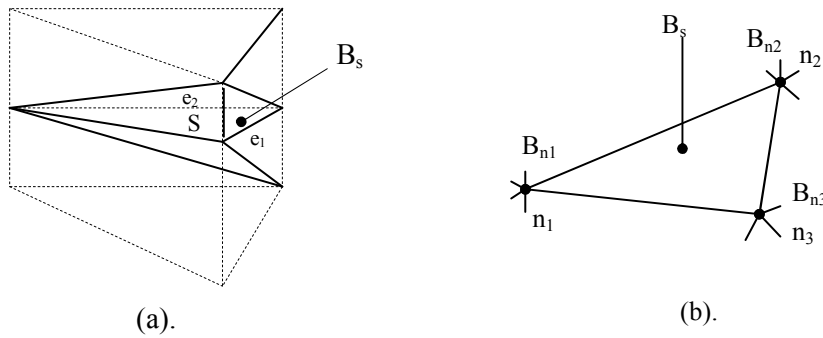


Figure III.3 Calcul de la densité de flux  $B_s$

Une autre méthode, est donnée, pour le calcul de la densité du flux  $B_s$  dans les éléments qui ont les nœuds  $n_i$  sur la surface d'intégration  $S$ .

La densité du flux magnétique  $B_s$  est calculée en utilisant la valeur moyenne de  $B_{n_i}$  à partir des équations suivantes [19] :

$$B_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 B_{n_i}; \quad B_{n_i} = \frac{1}{n_e} \sum_{j=1}^{n_e} B_j \quad (\text{III. 58})$$

$n_e$  : est le nombre d'éléments que contient le nœud  $n_i$ .

$B_j$  : est la densité de flux dans l'élément  $j$ .

**b) Force déduite à partir de l'énergie magnétique totale**

La force magnétique dans ce cas est obtenue en calculant la dérivée de l'énergie magnétique par rapport au déplacement en maintenant le courant constant :

$$F_m = \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_{\Omega} \left( \int_0^B H. dB \right) . d\Omega \right) \tag{III. 59}$$

$x$  est la relation spatiale de la coordonnée.

**c) Force déduite à partir de la co-énergie magnétique**

La dérivée de la co-énergie magnétique par rapport au déplacement, tout en maintenant le flux constant, fournit la force magnétique dont l'expression est la suivante :

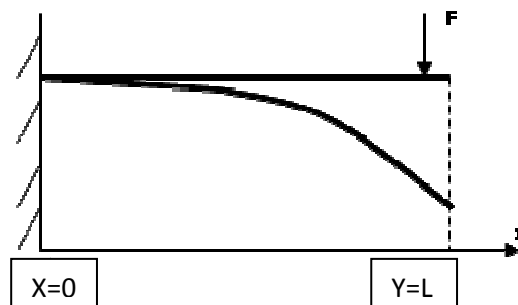
$$F_{co} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_{\Omega} \left( \int_0^H B. dH \right) d\Omega \right) \tag{III. 60}$$

**III.9 Modélisation des phénomènes élastiques**

Prenons le cas d'une poutre encastrée au niveau de l'une de ces extrémités. Une force perpendiculaire à la direction de la poutre appliquée sur l'extrémité libre engendre un champ de déplacement et de déformation tel que à :

$x = 0$  : On enregistre une déformation maximale et un déplacement minimal.

$x = L$  : On enregistre une déformation minimale et déplacement maximal.



**Figure III.4 Déformation d'un barreau suivant sa direction longitudinale**

Le comportement élastique de toute structure dépend des propriétés mécaniques de son matériau. Ces propriétés sont données par les coefficients de Young et de Poisson.

Considérant un barreau de longueur « l », à qui une force  $f$  est appliqué dans la direction longitudinale. Dans le cas où la force tend à allonger le barreau, on parle de traction. Dans le cas où elle tend à le comprimer, on parle de compression.

Soumis à cette force, le barreau subit une déformation définie par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \tag{III.61}$$

Avec :

$\varepsilon$  : La déformation longitudinale.

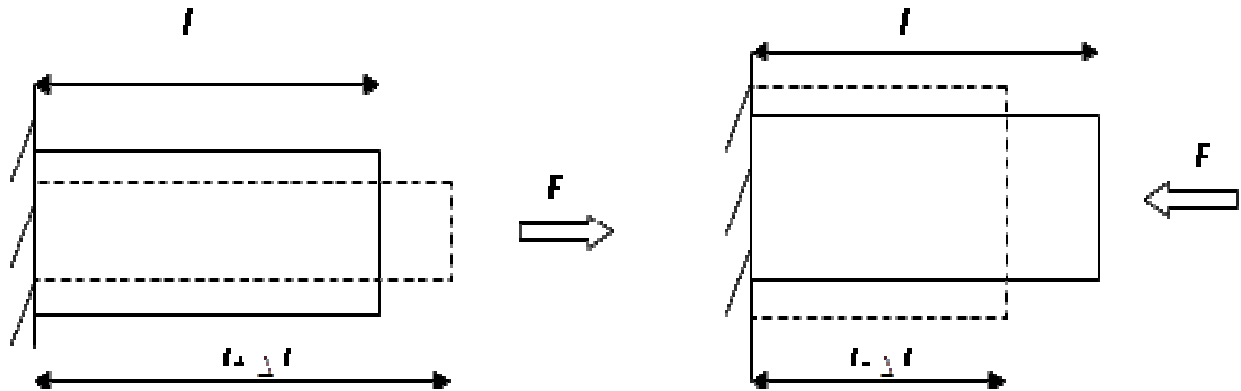


Figure III.5 Déformation d'un barreau suivant sa direction longitudinale

En désignant par  $S$  la section du barreau (perpendiculaire à la direction de traction), on définit la contrainte de traction :  $\sigma = \frac{F}{S}$  exprimée en  $(\text{N}/\text{m}^2)$ .

En 1678, en s'appuyant sur l'expérimentation, Robert HOOKE, établit que dans le domaine élastique linéaire, l'allongement d'une structure dans une direction donnée est proportionnel à la contrainte appliquée dans cette direction [20]. La loi de HOOKE prend alors la forme suivante :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{III.62})$$

Avec :

$E$  : Module de Young appelé aussi le module d'élasticité.

En effet, le coefficient caractérise la raideur de la matière. A contrainte égale, un matériau ayant un module d'élasticité élevé subira une déformation plus faible qu'un matériau ayant un module d'élasticité petit. Ainsi, pour une contrainte donnée, ce module permet de calculer la déformation dans la direction du chargement qu'on note : «  $v$  ».

Le coefficient de Poisson «  $\nu$  » permet de caractériser la contrainte de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliquée. Il a été mis en évidence analytiquement par Denis POISSON (1781-1840) [20].

La relation qui lie la déformation transverse et la déformation longitudinale est donnée par :

$$\varepsilon_{\perp} = \nu \varepsilon // \quad (\text{III.63})$$

**III.9.1 Discrétisation éléments finis**

Le problème d'élasticité est résolu par la méthode des éléments finis en calculant le déplacement à chaque nœud du maillage. La discrétisation de l'équation (III.13) aboutit à un système algébrique ; via la minimisation d'une formulation variationnelle en déplacement. Ceci revient à chercher le déplacement qui rend l'énergie mécanique totale minimale. Cette énergie est la somme algébrique de l'énergie de déformation  $E_p$ , l'énergie cinétique  $E_c$  et le travail  $T$  des forces extérieures :

$$E_t = E_p + E_c - T \tag{III.64}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon]^T \cdot [\sigma] dV \tag{III.65}$$

$$E_c = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{U}^T \cdot \dot{U} dV \tag{III.66}$$

$$T = \int_V f^v U dV \tag{III.67}$$

La minimisation de  $E_t$  traduit l'état d'équilibre de la structure (ce qui correspond à  $\delta_U E_t = 0$ ).

Le système algébrique final à résoudre obtenu après dérivation de  $E_t$  est [20] :

$$[M] \left[ \ddot{U} \right] + [K][U] = [F] \tag{III.68}$$

**III.10 Modélisation des phénomènes magnéto élastique**

**III.10.1 Définition**

L'objectif de cette partie est le comportement magnéto-élastique des matériaux ferromagnétiques employés dans le domaine du génie électrique.

Cette étude est limitée aux matériaux ferromagnétiques capables de s'aimanter en présence d'un champ magnétique.

Le phénomène de magnétostriction que présentent ces matériaux correspond à un couplage fort entre les propriétés magnétiques et mécaniques. Un champ magnétique produit une déformation (l'effet direct), tandis qu'une contrainte mécanique induit un changement de l'état magnétique (effet inverse). Cela se traduit par la dépendance du tenseur de contrainte  $\sigma$  et du champ magnétique  $\vec{H}$  vis-à-vis du champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  et du tenseur de déformation  $\varepsilon$  [21].

### III.10.2 Aspect macroscopique

#### III.10.2.1 Comportement mécanique

Lorsqu'on applique une contrainte sur un matériau, il se déforme. Les grandeurs utilisées pour décrire l'état mécanique sont les contraintes  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$ . La loi de comportement qui relie ces deux variables peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma = C.\varepsilon \quad (\text{III.69})$$

Cette relation est en générale non linéaire. Dans le cadre de l'élasticité linéaire, c'est une constante.

#### III.10.2.2 Comportement magnétique

Quand on soumet un matériau ferromagnétique à un champ magnétique il s'aimante. Les grandeurs utilisées pour décrire l'état magnétique sont le champ magnétique  $\vec{H}$ , l'induction magnétique  $\vec{B}$  et l'aimantation  $\vec{M}$ . Ces trois grandeurs sont utilisées par la relation suivante :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{III.70})$$

Où :  $\mu_0$  désigne la perméabilité du vide ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m])

La relation de comportement peut donc s'exprimer comme la relation entre le champ magnétique et l'induction :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{III.71})$$

Ou de façon équivalente par la relation :

$$\vec{M} = x \cdot \vec{H} \quad (\text{III.72})$$

La perméabilité et la susceptibilité étant reliées par la relation :

$$\mu = \mu_0 (1 + x) \quad (\text{III.73})$$

### III.11 Déformation de magnétostriction

Quand un matériau ferromagnétique est soumis à un champ magnétique, il se déforme. Cette déformation est associée à deux phénomènes distincts [21] [22] :

- Les forces d'origine magnétique, provoquent une déformation purement élastique.
- Les forces dues aux phénomènes de magnétostriction

### III.12 Aspect microscopique

La connaissance de la loi de comportement macroscopique ne suffit pas à définir l'état mécanique en un point donné du matériau [21]. La plupart des matériaux sont en effet de nature hétérogène ce qui conduit à une hétérogénéité des propriétés, de l'état de contrainte, de

déformation, d'aimantation et de champ. Il peut être dans ce cas utile de définir le comportement du matériau à une échelle plus fine, qui correspond à l'échelle microscopique.

### III.12.1 Comportement mécanique

Il est possible de définir des zones du matériau où l'hétérogénéité des propriétés mécaniques est beaucoup plus faible que pour le matériau dans son ensemble. Il s'agit par exemple des grains dans un poly-cristal. Dans ces zones, la relation du comportement est supposée uniforme et peut s'écrire :

$$\sigma^j = C^j \cdot \varepsilon^j \quad (\text{III.74})$$

En raison des orientations cristallographiques variables d'un grain à l'autre du poly-cristal, le tenseur  $c^j$  est différent d'un grain à l'autre.

L'un des objectifs de l'homogénéisation consiste à partir de la relation (III.74) et d'hypothèse sur la microstructure, à définir le milieu homogène équivalent (MHE), c'est-à-dire le tenseur d'élasticité qui vérifie la relation (III.69).

### III.12.2 Comportement magnétique

De la même façon que pour le comportement mécanique, les grandeurs magnétiques au sein d'un matériau sont aussi hétérogènes. L'observation assez fine d'un matériau magnétique permet de mettre en évidence l'existence de régions où l'aimantation est uniforme, ce sont les domaines magnétiques [23] [21], ou domaines de Weiss.

Chacun de ces domaines présente une aimantation uniforme  $M_s$  caractéristique du matériau. D'un domaine à l'autre, la norme de l'aimantation ne varie pas, mais sa direction en revanche change. Les zones de transition entre deux domaines appelés paroi magnétique.

- **Energie magnéto-élastique**

L'énergie magnéto-élastique permet de traduire les effets couplés entre phénomènes magnétiques et mécaniques ; elle dépend de l'orientation de l'aimantation, des composantes de la contrainte et des caractéristiques du matériau.

Avant d'introduire la notion d'énergie magnéto-élastique, il faut rappeler le phénomène de magnétostriction. Schématiquement, un atome est généralement considéré comme occupant un volume sphérique. Dans le cas de matériau il est plus vraisemblable de considérer que le volume qu'il occupe est légèrement ovoïde plus moins allongé (cas du fer) ou aplatis (cas du Nickel) dans la direction principale de magnétisation. Ces directions étant alignées dans des directions cristallines, il en résulte une légère déformation de la maille, qui se traduit par un monocristal par une déformation macroscopique. C'est la magnétostriction. Elle est positive pour le fer c'est-à-dire que la maille est légèrement allongée dans le sens de la

magnétisation ( $C > a$ ) (Figure IV.3). Elle est négative pour le Nickel, c'est-à-dire que la maille est légèrement aplatie ( $C < a$ ).

Si une conservation du volume est admise à cette échelle, l'effet Poisson entraîne une déformation opposée dans les autres directions [24].

Les processus d'aimantation s'accompagnent donc d'une déformation spontanée. Il s'agit souvent de déformation très faible, mais qu'on ne peut ignorer. Ces déformations induisent des contraintes et le cristal fait apparaître une énergie de type élastique. C'est l'énergie magnéto-élastique.

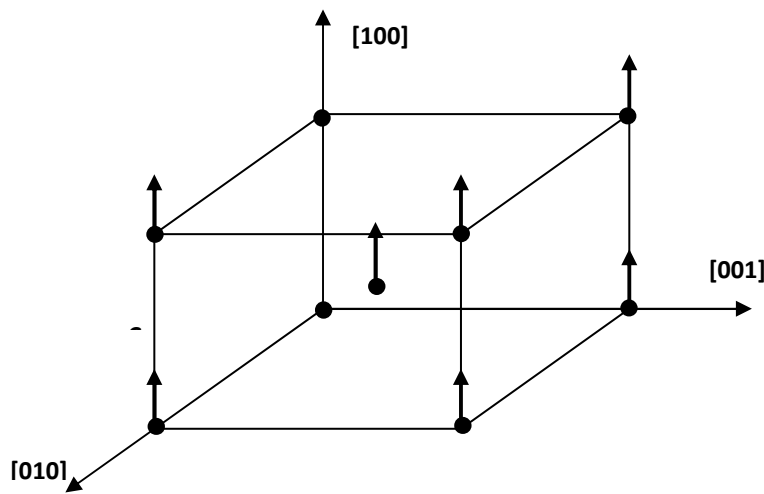


Figure III.6 Distorsion de la maille cubique dans le fer  $C > a$

Ce phénomène peut être caractérisé par un coefficient de déformation :

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{III.75})$$

$\Delta L$  : Variation de la longueur dans la direction de magnétisation.

L'énergie du cristal par unité de volume est donc la somme de contribution de l'énergie élastique et l'énergie magnéto-élastique [24].

La formule générale de l'énergie élastique est :

$$E_{el} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2) + 2C_{44}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2) + C_{12}(\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}\varepsilon_{11}) \quad (\text{III.76})$$

$C_{11}$  : Module de traction

$C_{12}$  et  $C_{44}$  : Module de cisaillement

L'énergie magnéto-élastique induite par la déformation du cristal s'écrit :

$$E_{mel} = B_1(\varepsilon_{11}\alpha_1^2 + \varepsilon_{22}\alpha_2^2 + \varepsilon_{33}\alpha_3^2) + 2B_2(\varepsilon_{12}\alpha_1\alpha_2 + \varepsilon_{23}\alpha_2\alpha_3 + \varepsilon_{31}\alpha_3\alpha_1) + B_3(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \quad (III.77)$$

$B_1, B_2, B_3$  : Constante ;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  : Cosinus directeurs de l'aimantation.

$$W = E_{el} + E_{mel}$$

La magnétisation d'un matériau ferromagnétique entraîne une déformation et réciproquement l'application d'une déformation induit une modification de l'état magnétique de la microstructure.

- **Energie magnétostatique**

L'énergie magnétostatique se divise en deux contributions [22].

L'énergie associée au champ magnétique appliqué  $\vec{H}$  ou énergie Zeeman s'écrit :

$$W_z = -\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{M} \quad (III.78)$$

Ce terme énergétique tend à aligner l'aimantation avec celle du champ appliqué.

Par ailleurs, les variations spatiales d'aimantation provoquent un champ démagnétisant  $\vec{H}_d$  auquel est associée une énergie qui s'écrit :

$$W_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \vec{H}_d \cdot \vec{M} \quad (III.79)$$

L'énergie magnétostatique s'écrit donc :

$$W_{mag} = -\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{M} - \frac{1}{2} \mu_0 \vec{H}_d \cdot \vec{M} \quad (III.80)$$

$$W_{mag} = -\mu_0 H^{eff} \cdot \vec{M} \quad (III.81)$$

Avec :

$$H^{eff} = H^0 + \frac{1}{2} H_d \quad (III.82)$$

### III.13 Procédure de simulation des vibrations d'origine électromagnétiques

#### III.13.1 Réponses aux excitations

Le choix de la méthode pour la résolution de l'équation élasticodynamique dépend de la nature de l'excitation et éventuellement de la taille du problème. Le système peut être résolu en pas à pas dans le temps ou par une méthode qui consiste à le résoudre dans la base des vecteurs propres.

Les forces magnétiques dans une machine électrique présentent généralement une période temporelle. Le théorème de superposition permet alors d'étudier la réponse mécanique de la structure en deux temps.

- Faire une décomposition harmonique des forces appliquées.
- Calculer la réponse mécanique pour chaque harmonique.

En considérant les harmoniques, une formulation en complexe des équations de l'élastodynamique peut être utilisée pour calculer la réponse de la structure mécanique. Ceci réduit considérablement le temps de calcul par rapport à une simulation en pas à pas dans le temps.

Dans le cas de l'étude du comportement vibratoire d'une structure par un code de calcul élément finis. L'analyse de la réponse mécanique revient à étudier la réponse à chaque harmonique de force [20].

### **III.13.2 Couplage du point de vue physique**

Les problèmes physiques où le couplage magnéto mécanique intervient, sont de nature extrêmement diverses. On distingue alors deux cas :

- **Couplage faible** : La déformation où le déplacement rigide de la structure étudiée n'influe pas (ou de manière négligeable) sur les grandeurs magnétiques.
- **Couplage fort** : L'influence ne peut plus être négligée, les grandeurs magnétiques sont significativement modifiées.

### **III.13.3 Couplage du point de vue numérique**

Du point de vue numérique, le couplage fort c'est lorsque les équations magnétiques et mécaniques sont résolues simultanément.

Un problème physique, où les grandeurs magnétiques et mécaniques sont fortement couplées, peut être résolu par un couplage numérique faible. Ceci se traduit généralement par des résolutions successives alternant une résolution magnétique puis une résolution mécanique au sein d'un processus itératif et convergent.

Dans le même ordre la prise en compte d'un déplacement ou d'une déformation peut se faire en pas à pas dans le temps.

### **III.14 Terme du couplage magnéto-élastique**

Le calcul de la force magnétique à un instant donné permet de déterminer par l'équation de la dynamique la déformation mécanique au pas suivant, permettant ainsi le calcul magnétique correspondant qui tient compte des déformations. Ce cas est un exemple typique où un couplage numérique faible permet de résoudre un problème physique fortement couplé.

### **III.15 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des phénomènes magnétiques qui permettent la modélisation des transformateurs, basés sur la méthode des éléments finis.

Les formulations éléments finis des modèles numériques à résoudre sont exprimées en termes du potentiel vecteur magnétique en hypothèse bidimensionnelles cartésienne.

Ensuite une introduction au comportement élastique de la matière a été présentée ainsi que le fondement théorique de la modélisation des phénomènes couplés magnéto élastiques. Des exemples d'application mettant en œuvre ce modèle seront présentés dans le chapitre suivant.

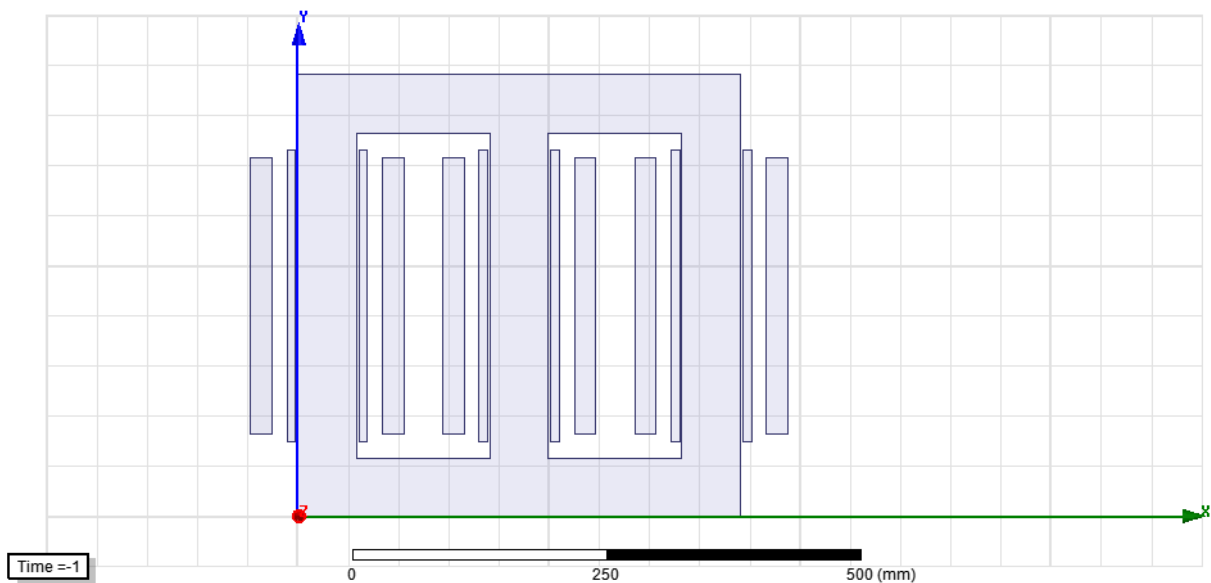
## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous mettrons en application un modèle de transformateur de puissance triphasé de type abaisseur fabriqué par l'entreprise ENEL (Entreprise National Electro-industries) à AZAZGA. Nous allons présenter ces caractéristiques techniques et la démarche à suivre pour l'étude.

Pour une bonne précision de calcul, il est nécessaire de disposer d'un outil informatique très performant diminuant le temps de calcul et donnant une grande précision. Le logiciel ANSYS Maxwell répond parfaitement aux exigences souhaitées.

## IV.2 Géométrie et dimensions du transformateur triphasé

La géométrie étudiée dans notre travail est un transformateur triphasé tel qu'illustré dans la figure ci- dessous (Figure IV.1).



**Figure IV.1 Géométrie du transformateur sous l'environnement ANSYS Maxwell 2D**

➤ **Les caractéristiques géométriques**

Le tableau suivant représente les dimensions du circuit magnétique et celles des bobines du transformateur.

Composantes	Dimensions	valeurs		Unités
Enroulements primaire et secondaire	Hauteur de la BT	290		mm
	Hauteur de la HT	276		mm
	Diamètre intérieur et extérieur de la BT	115	132	mm
	Diamètre intérieur et extérieur de la HT	162	205	mm
	Epaisseur de la BT	8.5		mm
	Epaisseur de la HT	21.5		mm
Circuit magnétique	Section active du fer	82.2		Cm <sup>2</sup>
	Section totale du fer	85.6		Cm <sup>2</sup>
	Largeur et hauteur du 1 <sup>er</sup> étage de tôles	100	46/2	mm
	Largeur et hauteur du 2 <sup>ème</sup> étage	85	70/2	mm
	Largeur et hauteur du 3 <sup>ème</sup> étage	70	84/2	mm
	Largeur et hauteur du 4 <sup>ème</sup> étage	55	96/2	mm
	Largeur et hauteur du 5 <sup>ème</sup> étage	40	104/2	mm
	Longueur de la fenêtre du noyau (loc)	340		mm
	Longueur de la couche du noyau (L1)	2*220		mm
	Longueur de la colonne latérale de la couche (L2)	2*220		mm
	Longueur de la colonne centrale de la couche (L3)	436		mm
Diamètre de la tôle magnétique	0.3		mm	

**Tableau IV.1 Caractéristiques géométriques du transformateur**

➤ Les Caractéristiques magnétiques du transformateur

Région	Conductivité électrique $\times 10^{-6} [\Omega m]^{-1}$	Perméabilité magnétique relative
Enroulement (cuivre)	5.8	1
Matériau magnétique	1.9	-
Air environnant	0	$4\pi 10^{-7}$

Tableau IV.2 Propriétés électromagnétique

✚ Courbe de B(H) du matériau utilisé (Steel\_1008)

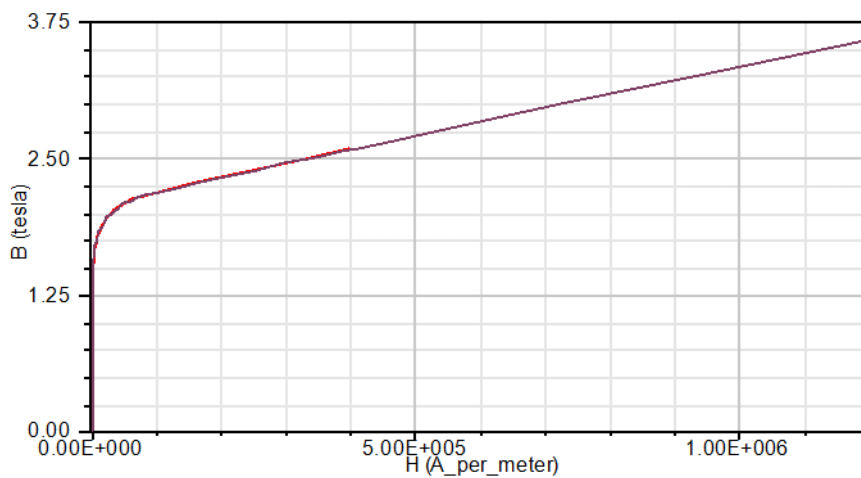


Figure IV.2 Courbe de B = f(H)

Notons que le nombre de spires HT a deux valeurs maximale et nominale respectivement 6414 et 6108. L'enroulement BT possède un nombre de spires de valeur  $2 \times 47$ .

➤ Les Caractéristiques électriques du transformateur

Les caractéristiques électriques du transformateur étudié sont regroupées dans le tableau suivant :

caractéristiques	valeurs	unités
Puissance apparente	50	KVA
Nombre de phase	3	-
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Connexions des enroulements primaires	étoile	-
Connexions des enroulements secondaires	Zig-zag	-
Tension nominale au primaire	30	KV
Tension nominale au secondaire	0.4	KV
Courant nominale au primaire	0.96	A
Courant nominale au secondaire	72.2	A

**Tableau IV.3 Propriétés électriques du transformateur**

➤ **Composition chimique du noyau magnétique**

Il existe plusieurs compositions chimiques tel que fer silicium germanium cobalt, le noyau du transformateur que nous avons utilisé est de nature fer silicium.

### VI.3 Applications

Afin de recueillir les résultats de l'étude et modélisation de la déformation magnétique par magnétostriction et l'effet d'une action mécanique extérieure sur un transformateur triphasé, nous avons eu recours à deux logiciels de simulation, Maxwell 2d, et ANSYS Mechanical 3d. Pour cela nous avons effectué successivement trois applications.

#### APPLICATION 1 : ESSAI

1. Introduction de la géométrie du transformateur.
2. Choix les matériaux utilisés.
3. Choisir le type de la solution (transitoire, magnétostatique, fréquentielle).
4. les conditions aux limites et le type d'excitation.
5. Le maillage éléments finis.
6. Le calcul des inductances.
7. Le calcul des forces magnétiques dans le circuit.
8. Récupérer la courbe de la force magnétique du circuit.
9. Visualiser la répartition du potentiel vecteur magnétique A.
10. Visualiser la répartition de l'induction magnétique B.
11. Visualiser la répartition des forces magnétiques F.

**APPLICATION 2**

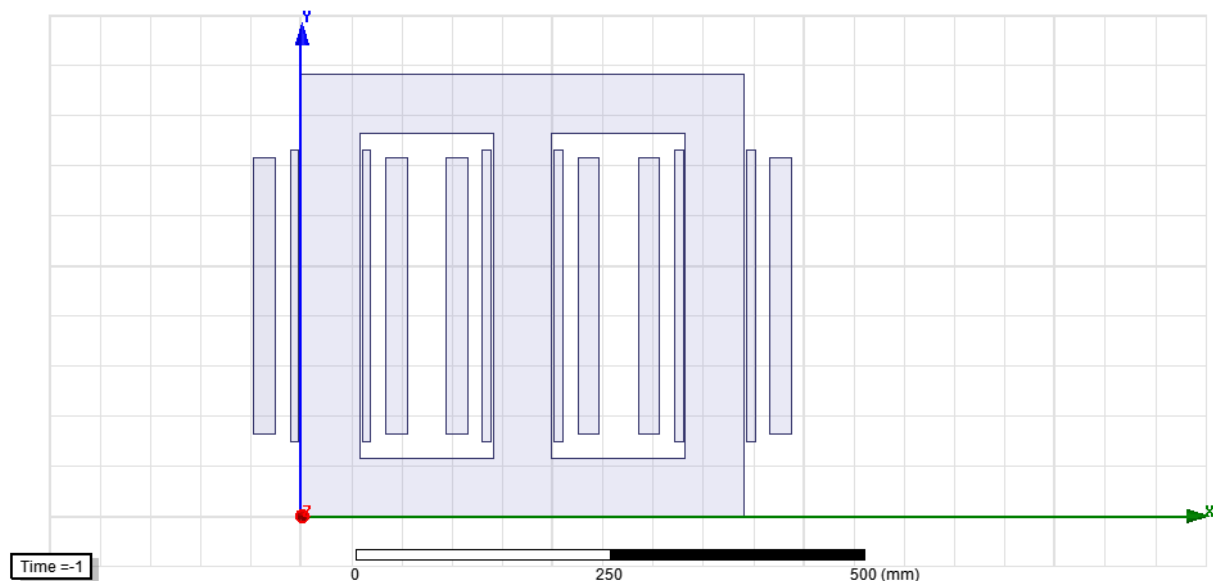
1. Introduction des courbes de  $B = f(H)$  du matériau fe-si et retracer les différentes courbes pour chaque valeur injecté.
2. Formulation mathématique du problème magnétostrictif, et l'observation des résultats de la distribution du potentiel vecteur magnétique A, de l'induction magnétique B, des forces magnétiques F et de la déformation.
3. Etude de l'influence des défauts sur la déformation, l'induction et la tension induite.

**APPLICATION 3**

1. Etude structurelle du couplage magnéto mécanique d'une tôle magnétique du transformateur sous ANSYS Mechanical 3d.
2. Etude de l'effet de contrainte mécanique extérieure qui est la traction sur la tôle magnétique.

**APPLICATION 1 Simulation des propriétés magnétiques du transformateur triphasé en utilisant Ansys Maxwell 2D**

➤ **La géométrie du transformateur**



**Figure IV.3 Géométrie du transformateur triphasé**

➤ Le maillage éléments finis du transformateur

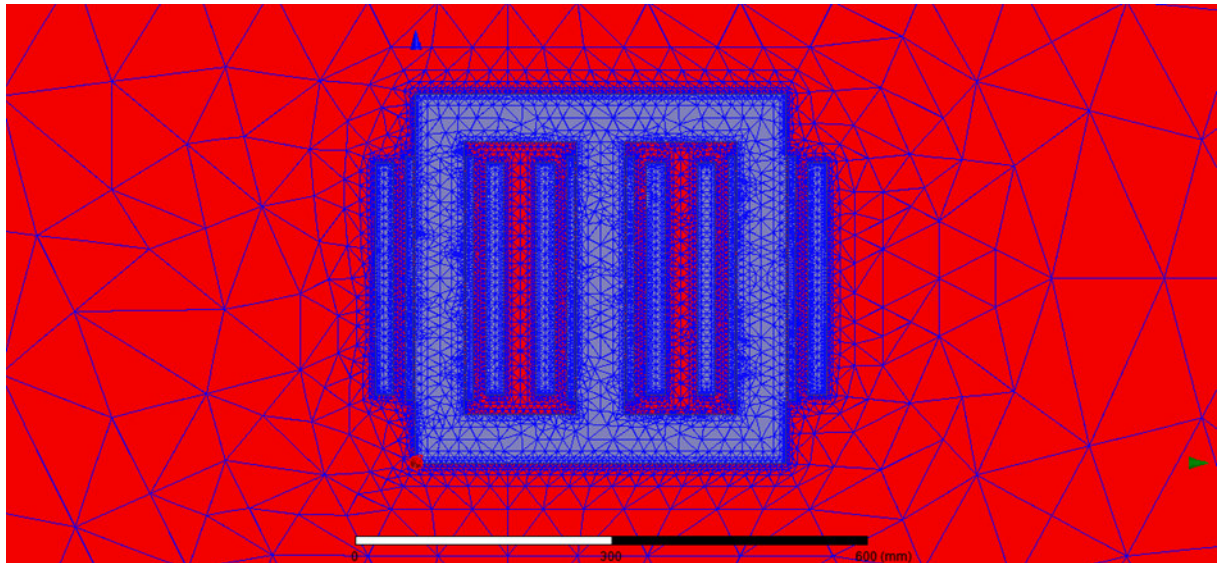


Figure IV.4 Maillage éléments finis

➤ Calcul des inductances

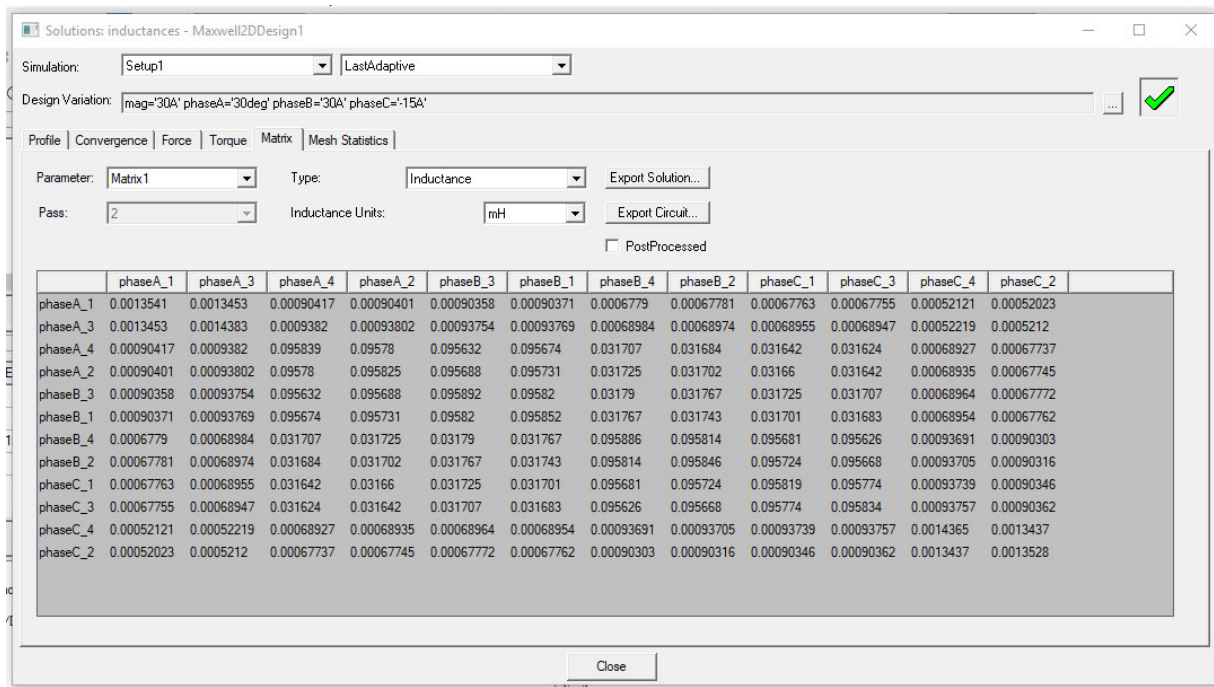


Figure IV.5 Valeurs des inductances calculées sous l'environnement ANSYS Maxwell

➤ Représentation des allures de force

Les figures ci- dessous représentent les allures de la force magnétique (sinusoïdale) respectivement suivant OX, OY, XY.

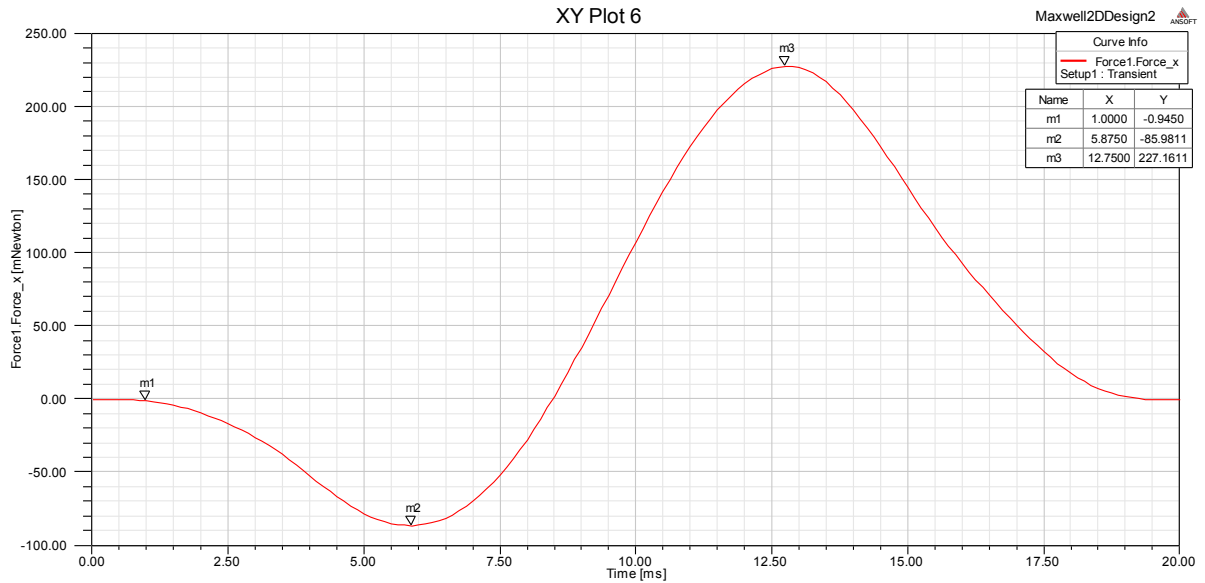


Figure IV.6 Allure de la force magnétique suivant OX

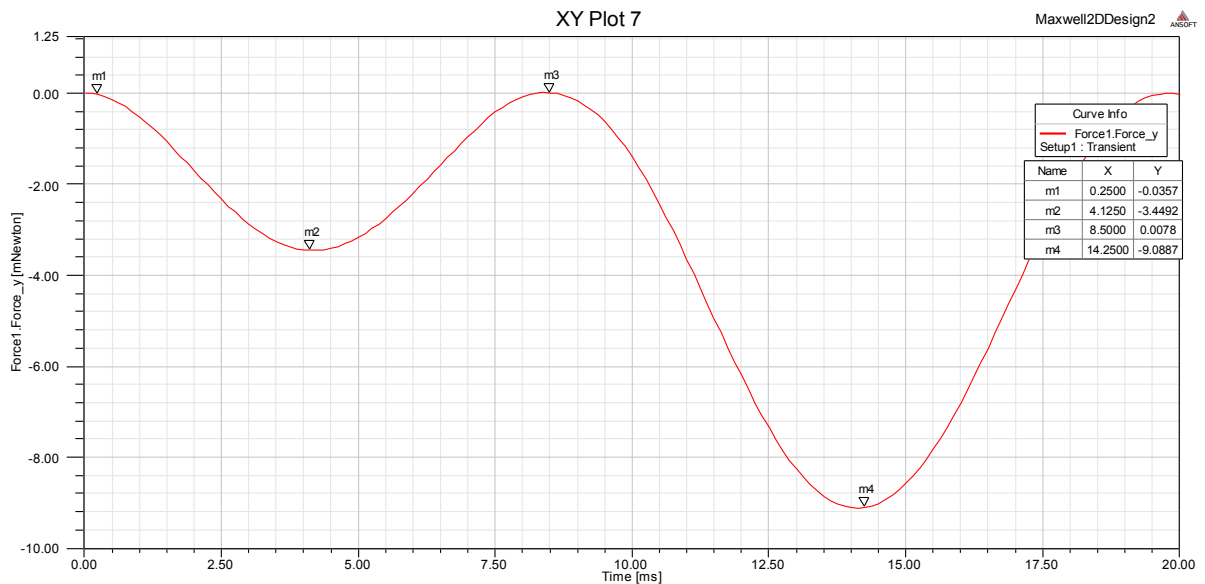
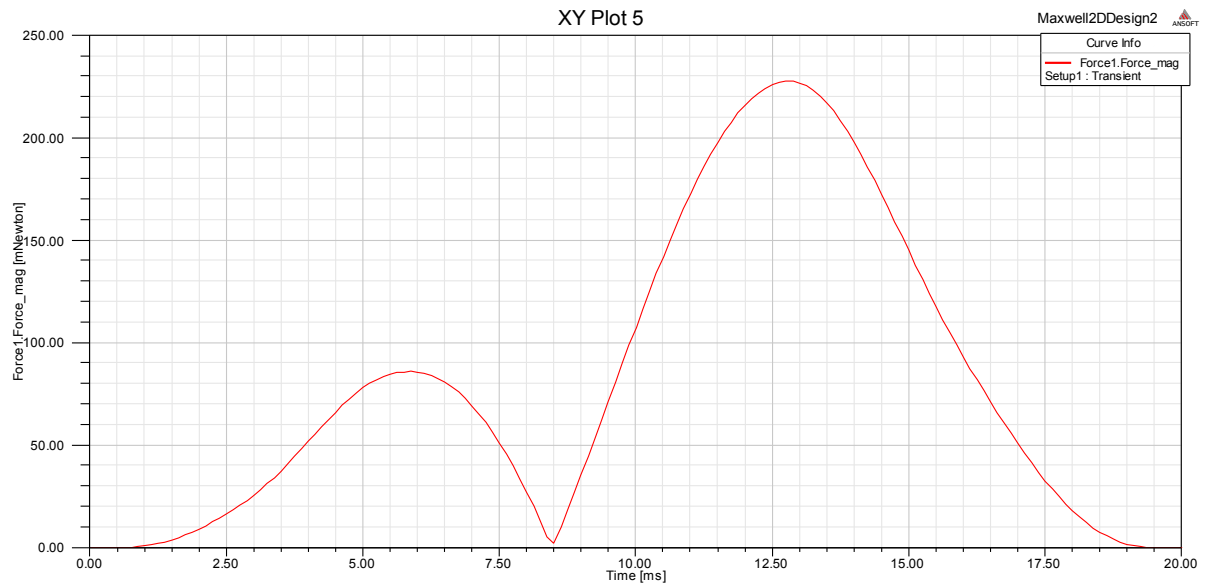


Figure IV.7 Allure de la force magnétique suivant OY



**Figure IV.8 Allure de la force magnétique suivant XY**

### ➤ Interprétation des figures

La variation de la force magnétique suivant OX a une allure sinusoïdale démarrant d'une valeur initiale nulle, à l'instant  $t = 1\text{ms}$ , elle diminue progressivement atteignant un pic négatif de valeur  $F = -85.9811\text{N}$ .

Elle augmente pour atteindre un pic positif de l'ordre de  $227.1611\text{N}$ ; et le cycle se reproduit. (Figure : IV.6) pour chaque période de temps  $T=1/f$ .

L'évolution de la force suivant OY démarre d'une valeur nulle, à l'instant  $t = 0.25\text{ms}$  elle commence à décroître et atteint un premier pic de valeur négative  $F = -3.4492$  à l'instant  $t = 4.125\text{ms}$ .

Elle augmente légèrement, et atteint son deuxième pic cette fois-ci positif à l'instant  $t = 8.5\text{ms}$ .

Elle diminue remarquablement à l'instant  $t = 14.25\text{ms}$  et atteint une valeur de  $-9.0887\text{N}$ . (Figure : IV.7).

L'allure de la force magnétique globale suivant XY démontre clairement que celle-ci ne s'annule pas durant une période, ayant des crêtes toujours positives. (Figure : IV.8).

➤ Répartition du potentiel vecteur magnétique A

Les figures suivantes représentent la répartition du potentiel vecteur magnétique a differents instants.

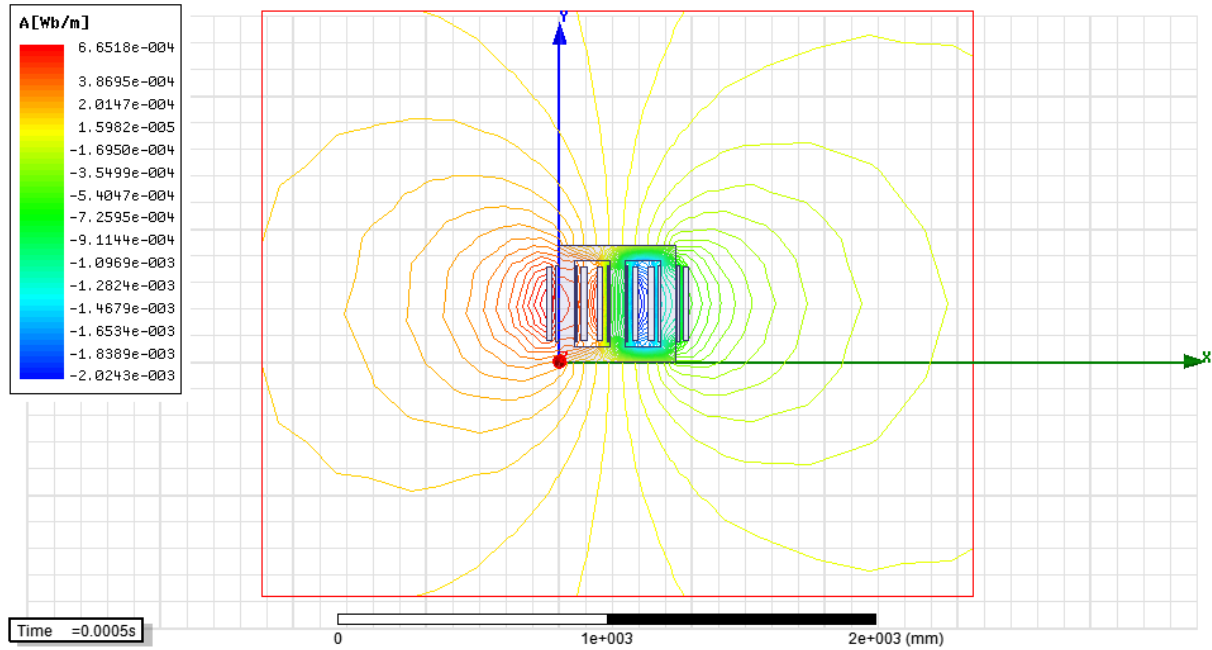


Figure IV.9 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à t= 0.0005s

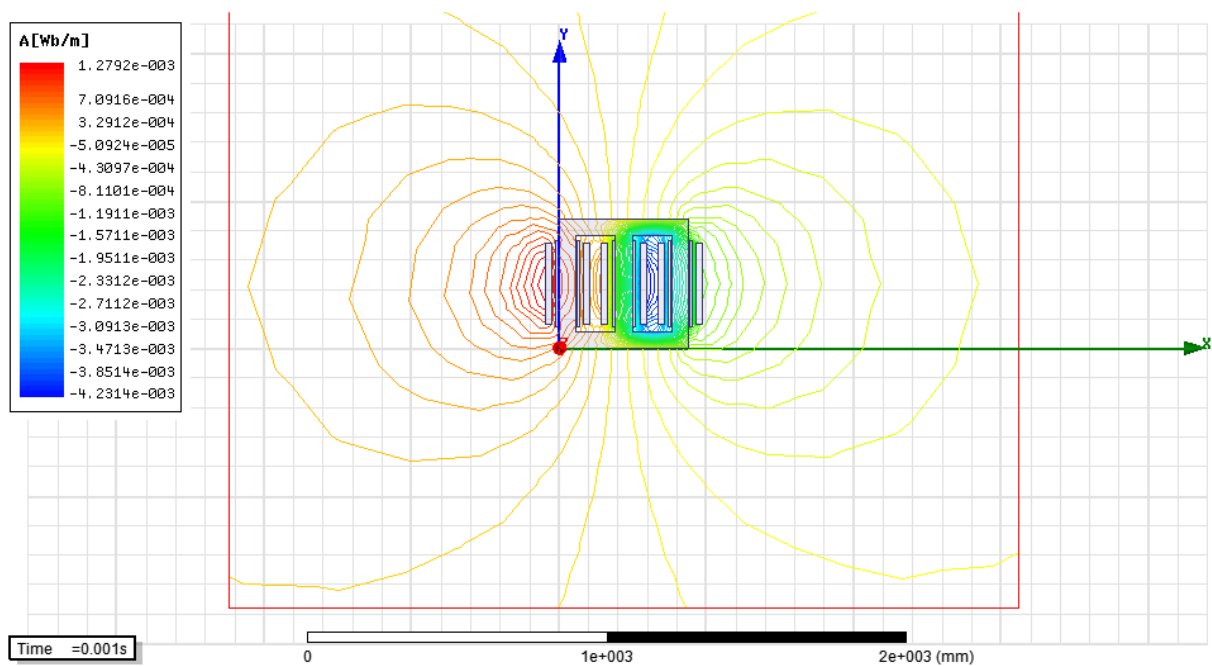


Figure IV.10 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à t=0.001s

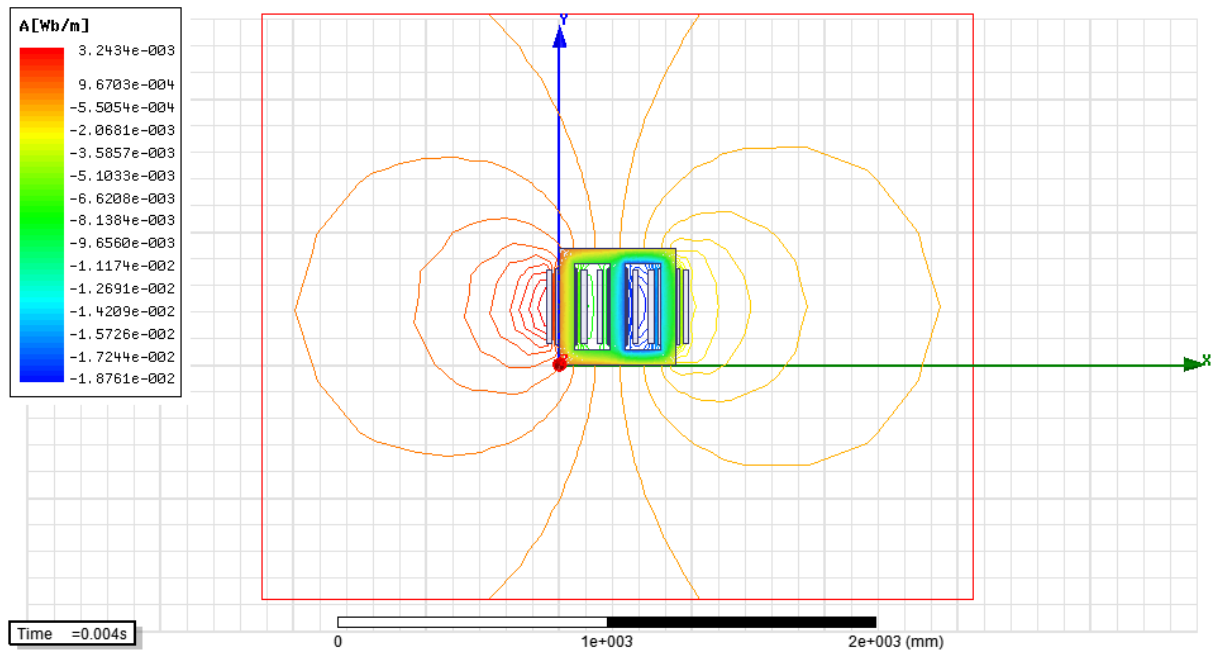


Figure IV.11 Répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.004$  s

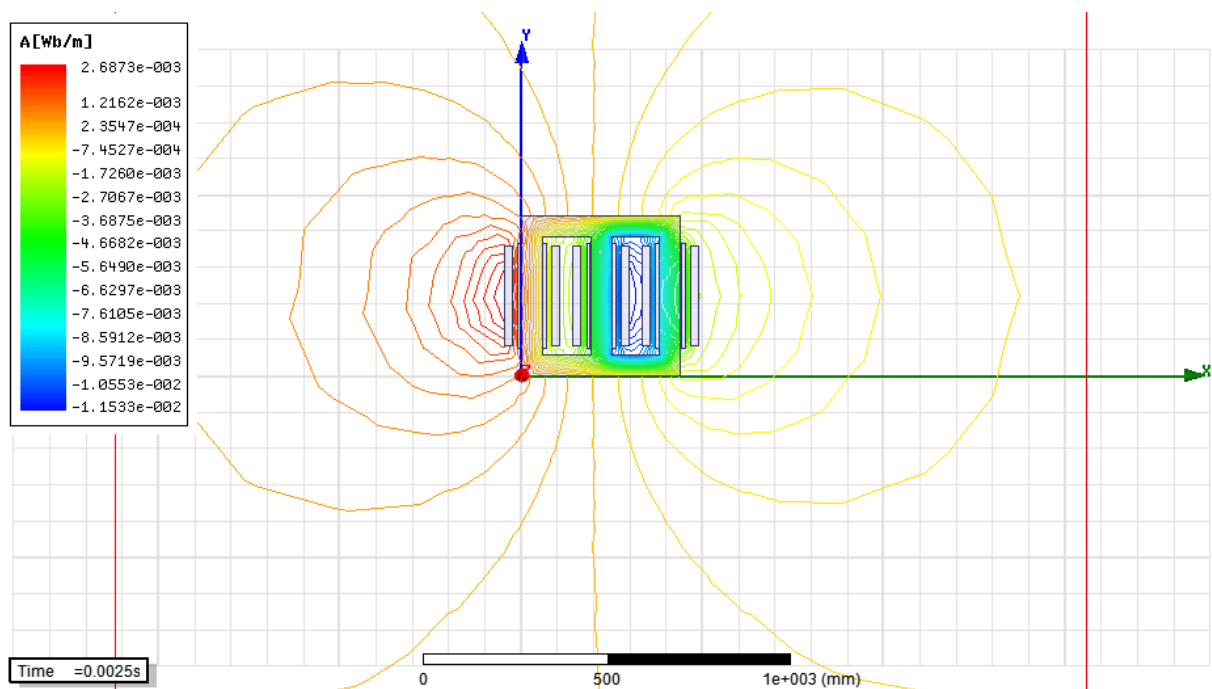


Figure IV.12 Répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.0025$  s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures (IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12) nous renseignent sur la répartition des lignes de champs et les différentes représentations du potentiel vecteur magnétique au niveau du circuit magnétique à des instants donnés.

A  $t=0.0005s$  on remarque que les lignes du potentiel vecteur magnétique se concentrent au niveau de la première colonne et atteignent une valeur de  $6,6418 \cdot 10^{-1}$  [Wb/m].

A  $t=0.001s$  les lignes du potentiel vecteur magnétique commencent à se diriger vers la deuxième colonne et atteignent une valeur de  $1,2792 \cdot 10^{-3}$  [Wb/m].

A  $t=0.004s$  les lignes de champs et l'intensité du potentiel vecteur magnétique occupent toute la culasse et atteignent une valeur de  $3,2434 \cdot 10^{-3}$  [Wb/m].

A  $t=0.0025s$  les lignes restent toujours dans toute la culasse mais commencent à se rediriger vers la première colonne avec une diminution d'intensité qui vaut  $2.6873 \cdot 10^{-3}$  [Wb/m].

➤ **Répartition de l'induction magnétique B**

Les figures ci-dessous représentent la répartition de l'induction magnétique.

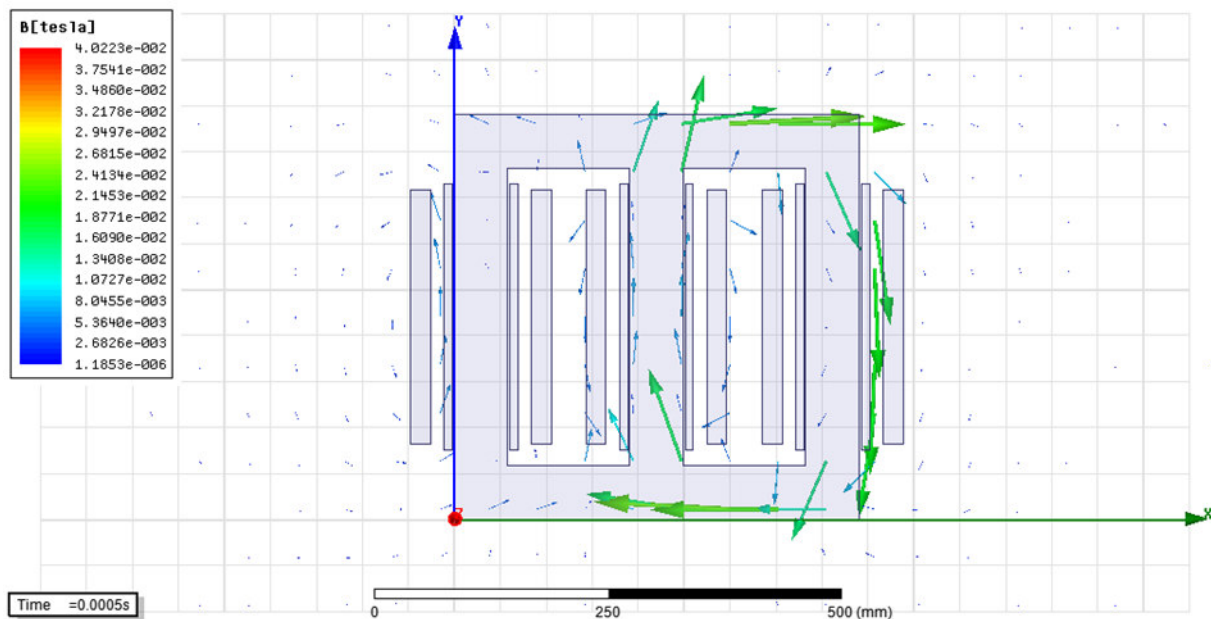


Figure IV.13 Répartition de l'induction magnétique B à  $t=0.0005s$

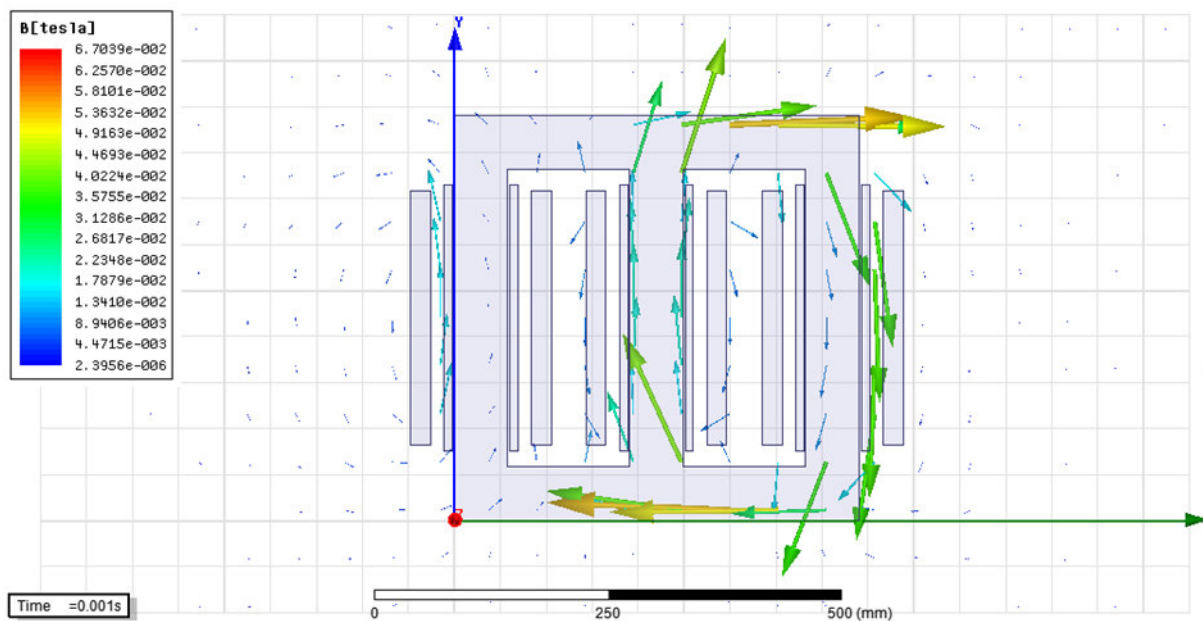


Figure IV.14 Répartition de l'induction magnétique  $B$  à  $t=0.001s$

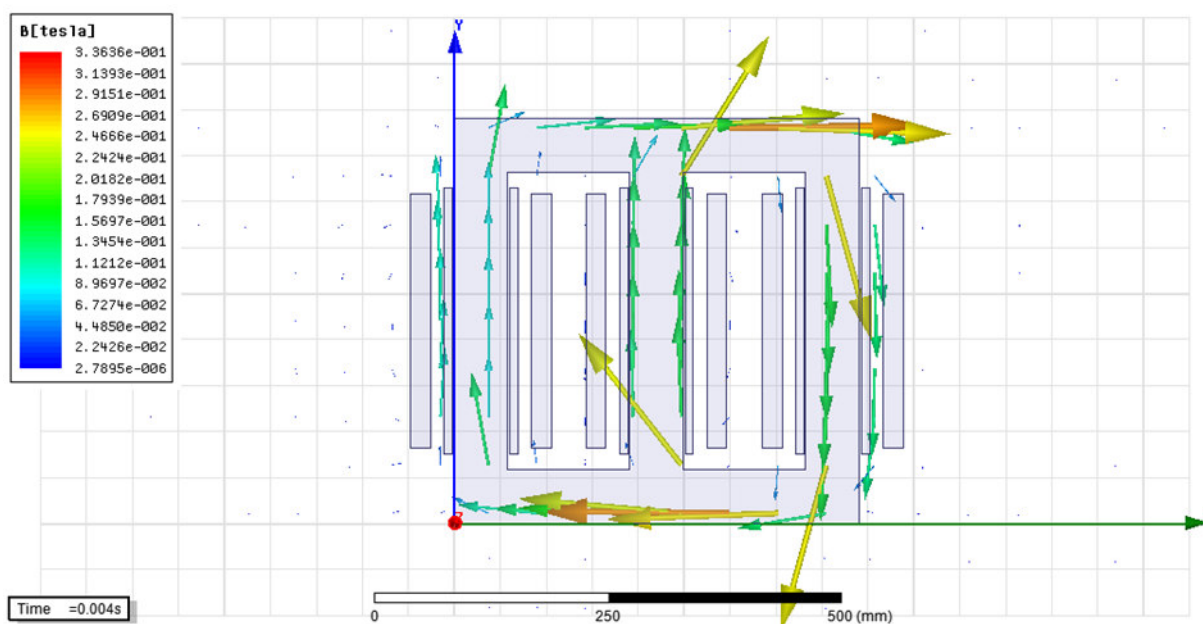


Figure IV.15 Répartition de l'induction magnétique à  $t=0.004s$

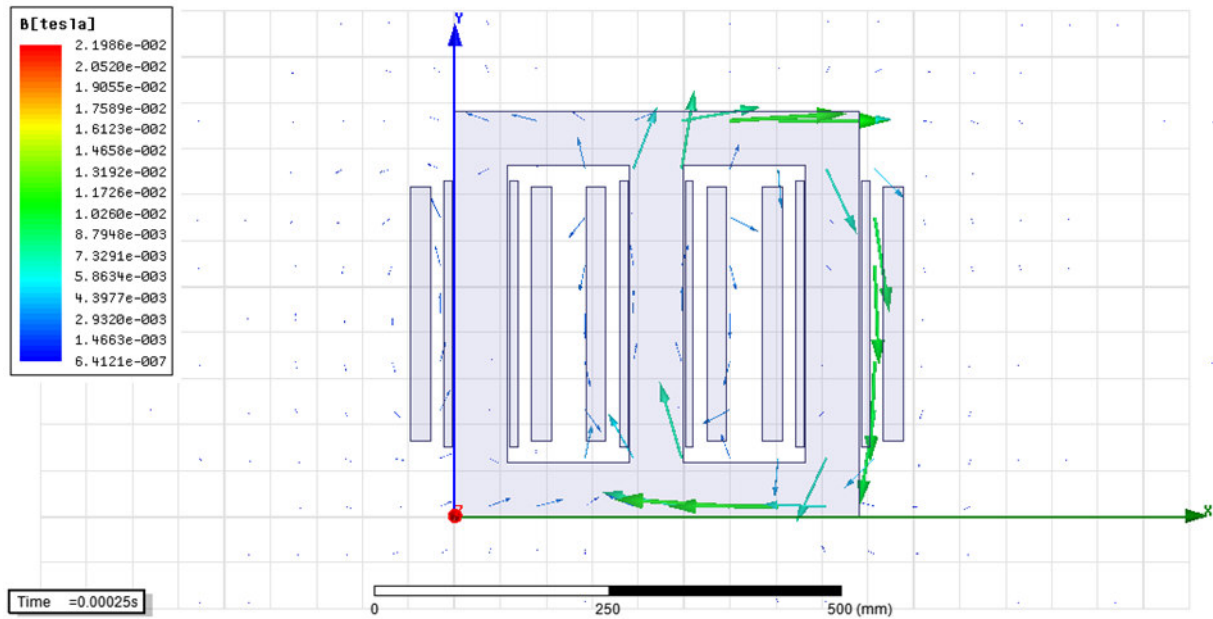


Figure IV.16 Répartition de l'induction magnétique à  $t=0.00025s$

#### ➤ Interprétation des figures

La répartition de l'induction magnétique dans la culasse varie en fonction du temps et suit la même variation que celle du potentiel vecteur magnétique et sa valeur est maximale aux extrémités, elle se focalise dans les pointes (effet de pointes).

A  $t=0.0005s$  l'induction magnétique maximale est de valeur  $B=4,0223 \cdot 10^{-2} T$

A  $t=0.001s$  l'induction magnétique est toujours maximale à  $B = 6.7039 \cdot 10^{-2} T$

A  $t=0.004s$  l'induction magnétique croit remarquablement jusqu'à atteindre une valeur de  $B= 3.3636 \cdot 10^{-1}T$ .

A  $t=0.00025s$  on remarque que l'induction diminue jusqu'à  $B = 2.1986 \cdot 10^{-2}T$ .

➤ Répartition des vecteurs de densité des forces magnétiques

Ces figures représentent la densité des forces magnétiques.

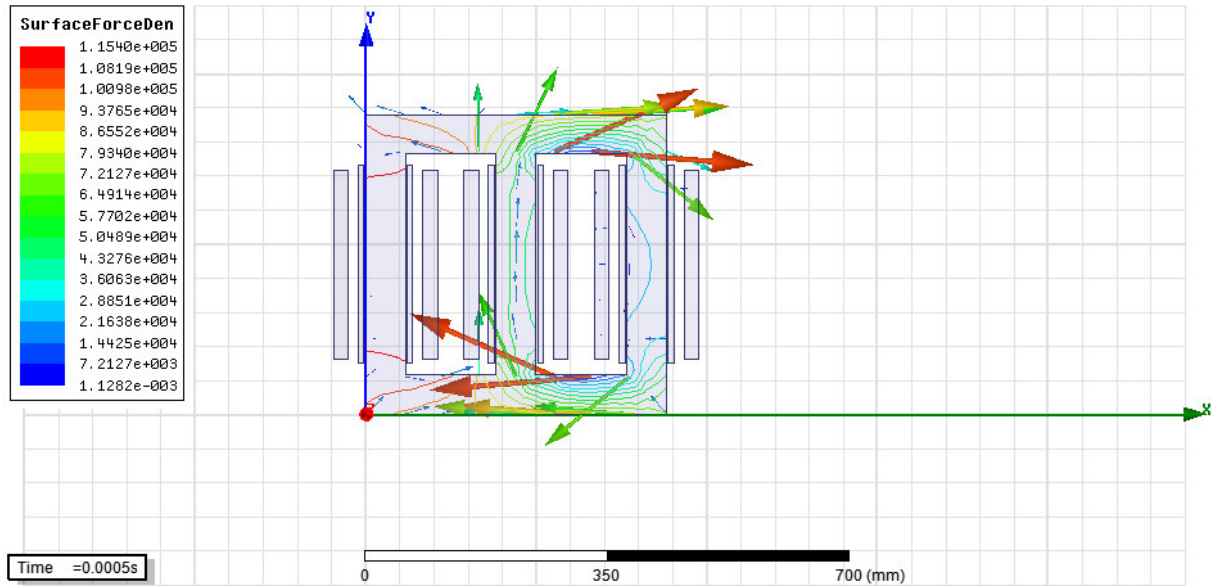


Figure IV.17 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.0005s$

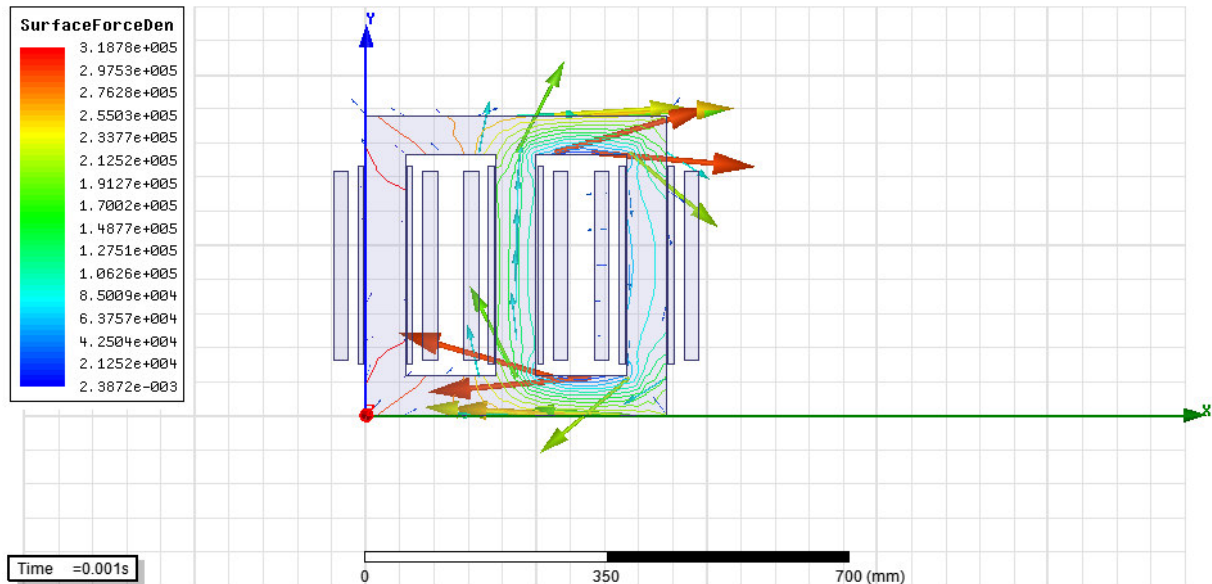


Figure IV.18 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.001s$

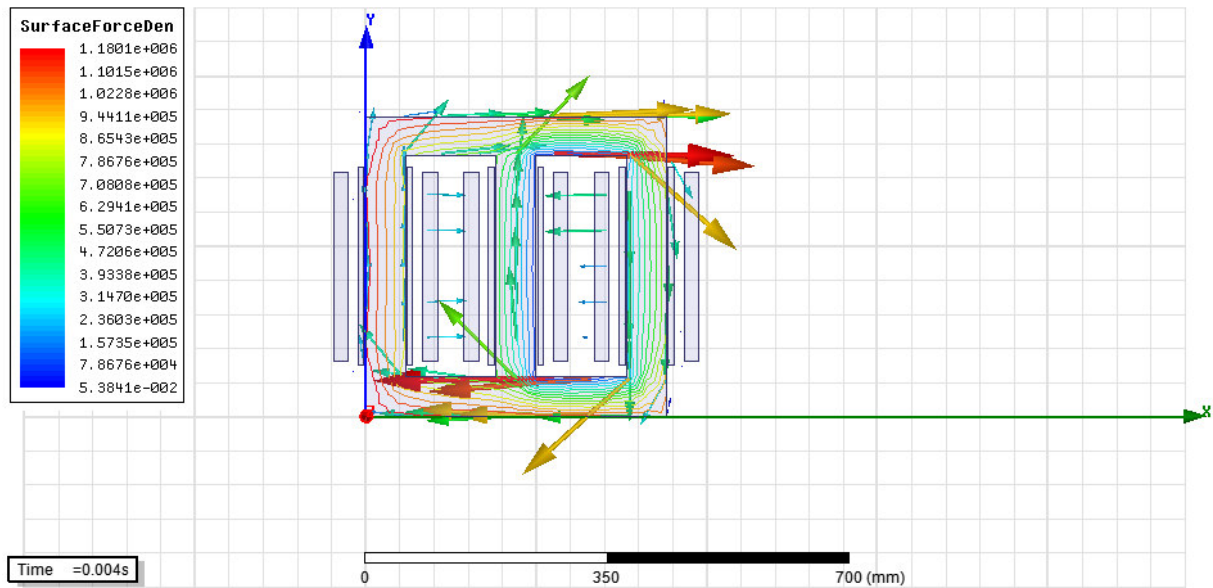


Figure IV.19 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.004s$

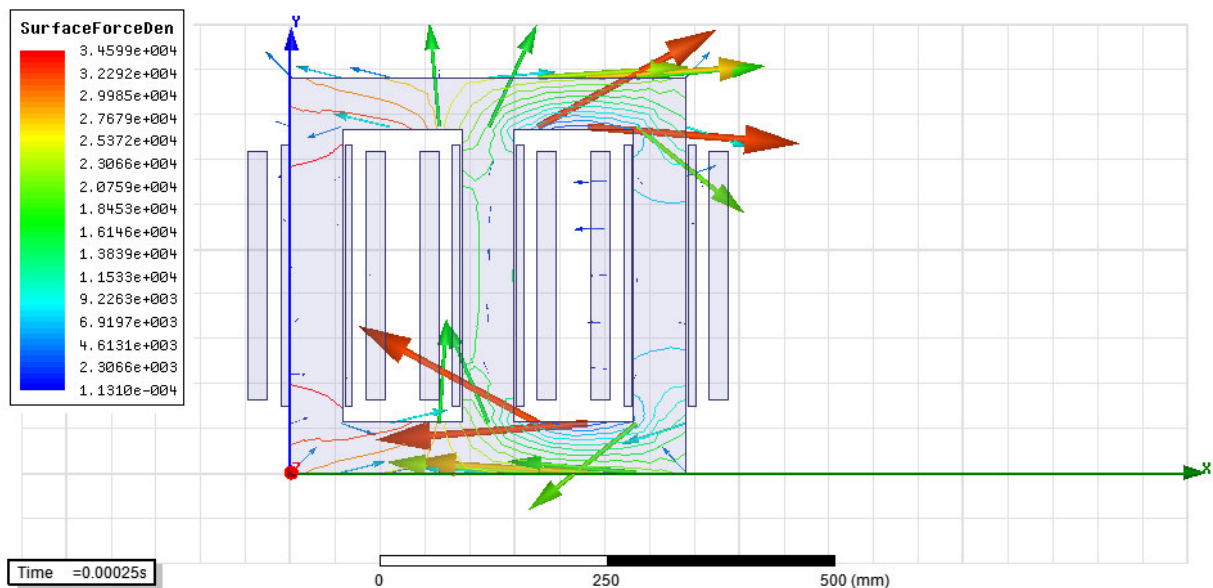


Figure IV.20 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.00025s$

➤ **Interprétation des figures**

Les vecteurs de la densité des forces magnétiques sont concentrés principalement au niveau des arêtes intérieures de la culasse. Leurs orientations se dirigent vers l'extérieur.

À différents pas de temps, les vecteurs s'orientent vers la deuxième colonne avec augmentation de la densité, en se stabilisant en premier lieu occupant ainsi toute la culasse.

Finalement, les vecteurs se réorientent vers la première colonne avec un sens intérieur et rejoignent leur localité initiale.

- Représentation des tensions
- Enroulement primaire (HT)

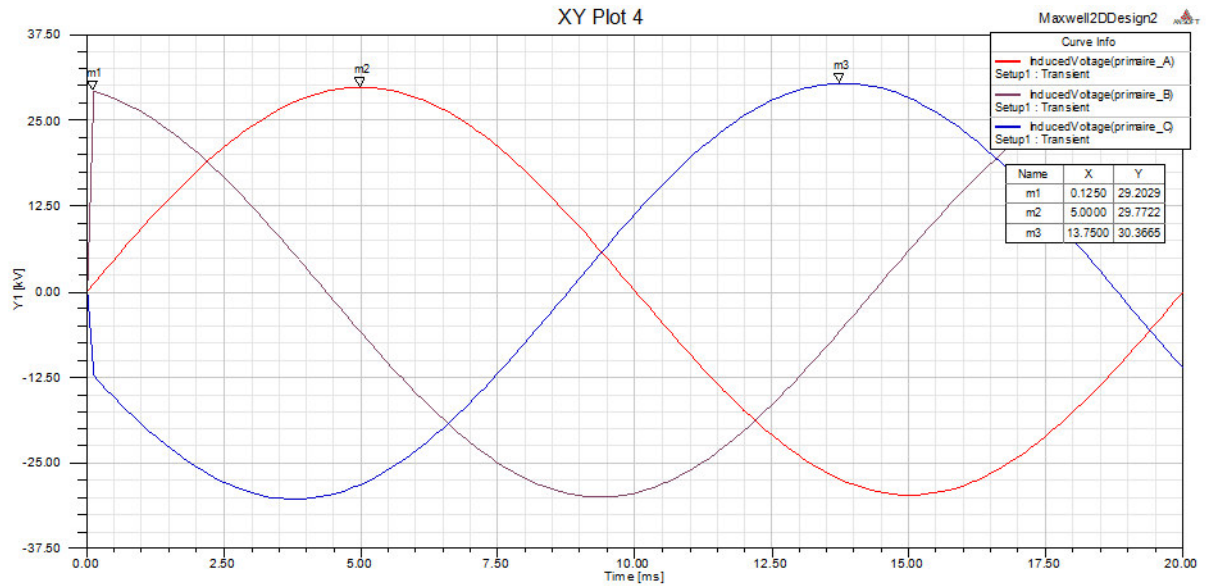


Figure IV.21 Tension d’aimantation au primaire

- Enroulement secondaire (BT)



Figure IV.22 Tension induite au secondaire

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.21) représente l'allure des tensions des trois phases primaires (A ; B ; C) déphasées les unes des autres, possédant approximativement la même valeur 30 KV.

La figure (IV.22) nous renseigne sur l'allure des tensions induites au secondaire. Les trois phases secondaires (A ; B ; C) sont déphasées, ayant approximativement le même pic de valeur de 400V, tel que donné dans le tableau (IV.3).

✚ **Représentation du potentiel et induction magnétique aux instants  $t_1$  ;  $t_2$  ;  $t_3$**

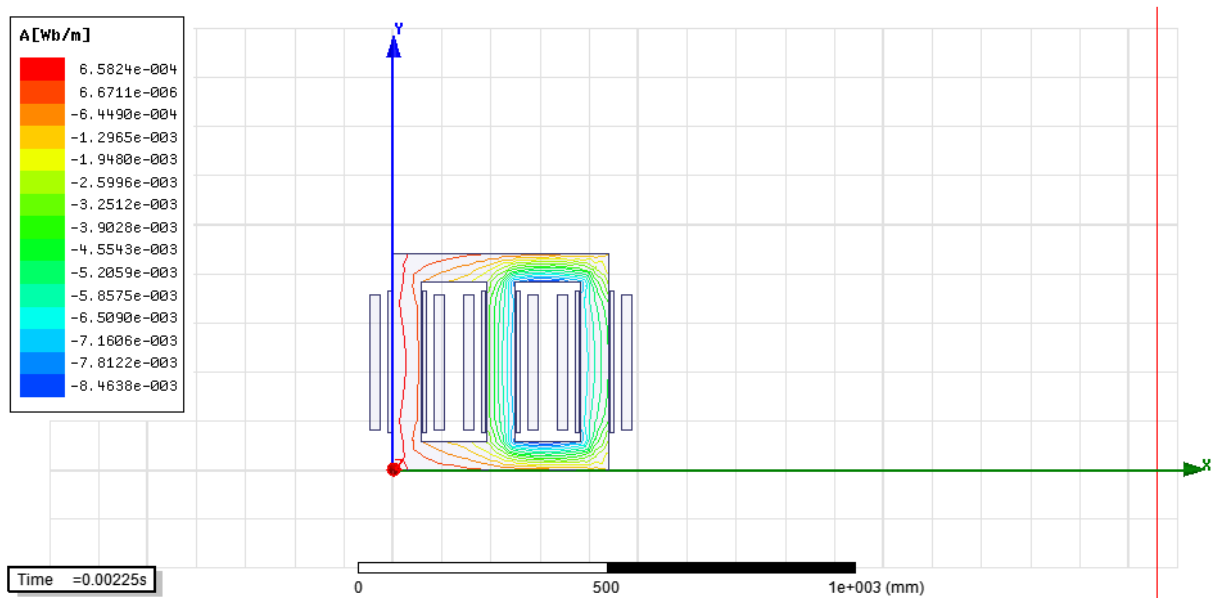


Figure IV.23 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_1=0.00225s$

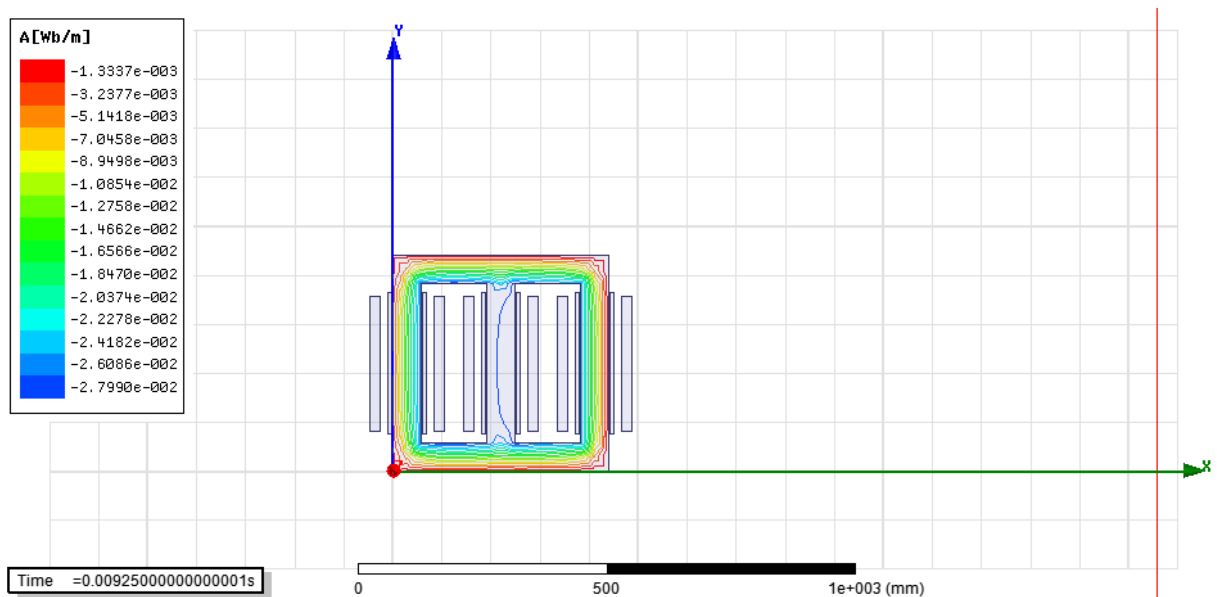


Figure IV.24 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_2=0.00925s$

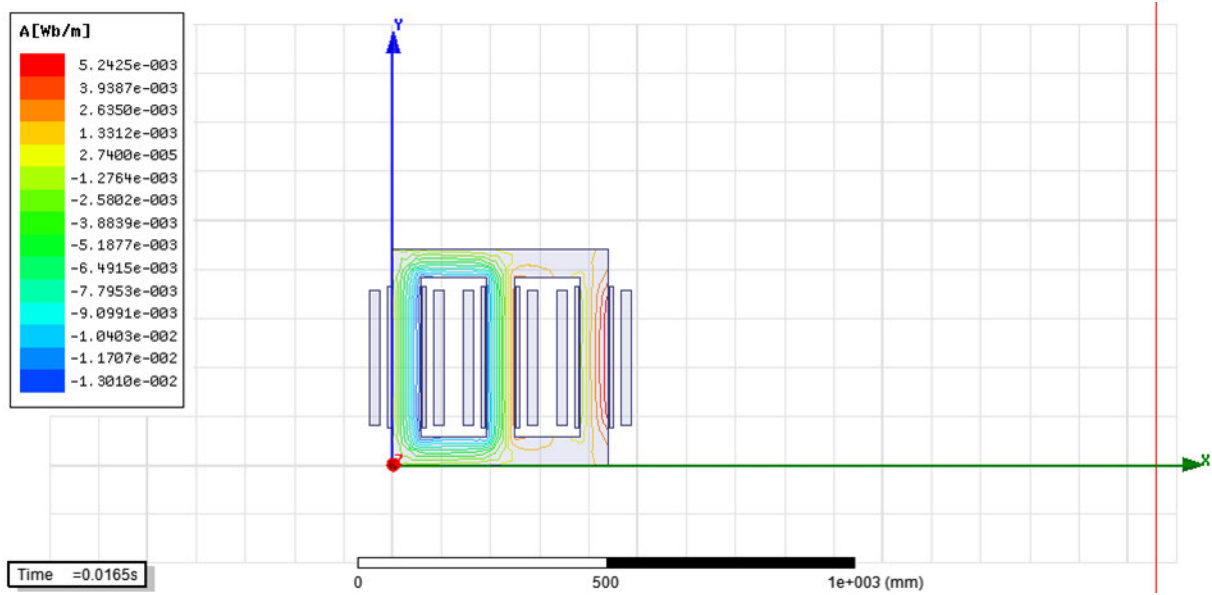


Figure IV.25 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_3=0.0165s$

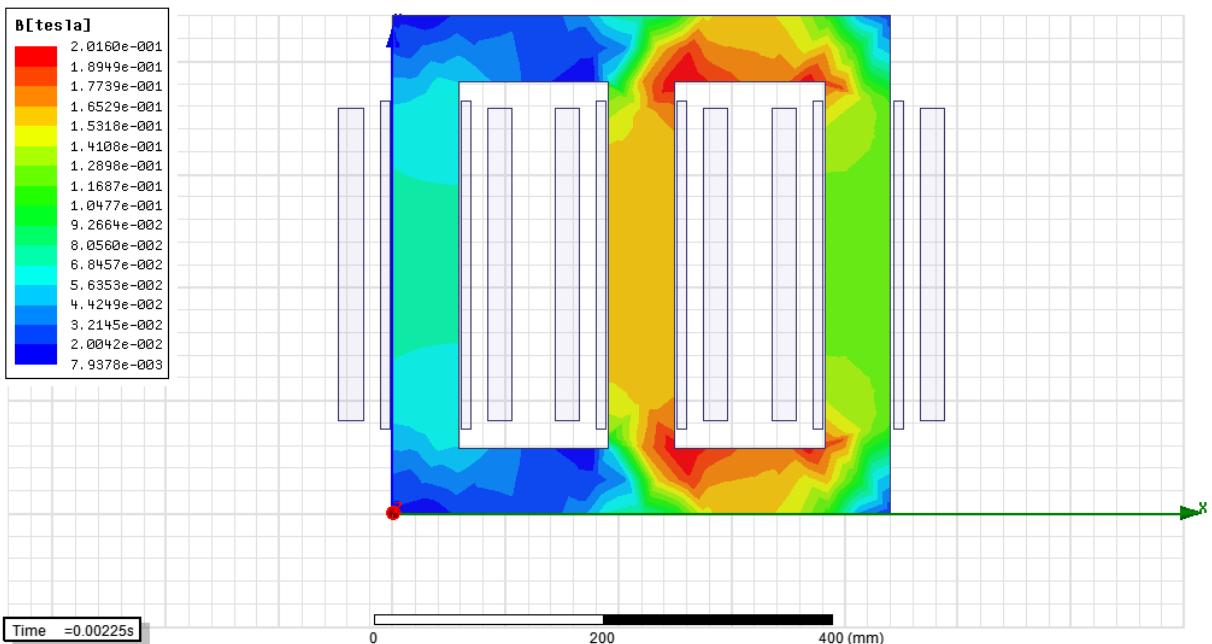


Figure IV.26 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_1=0.00225s$

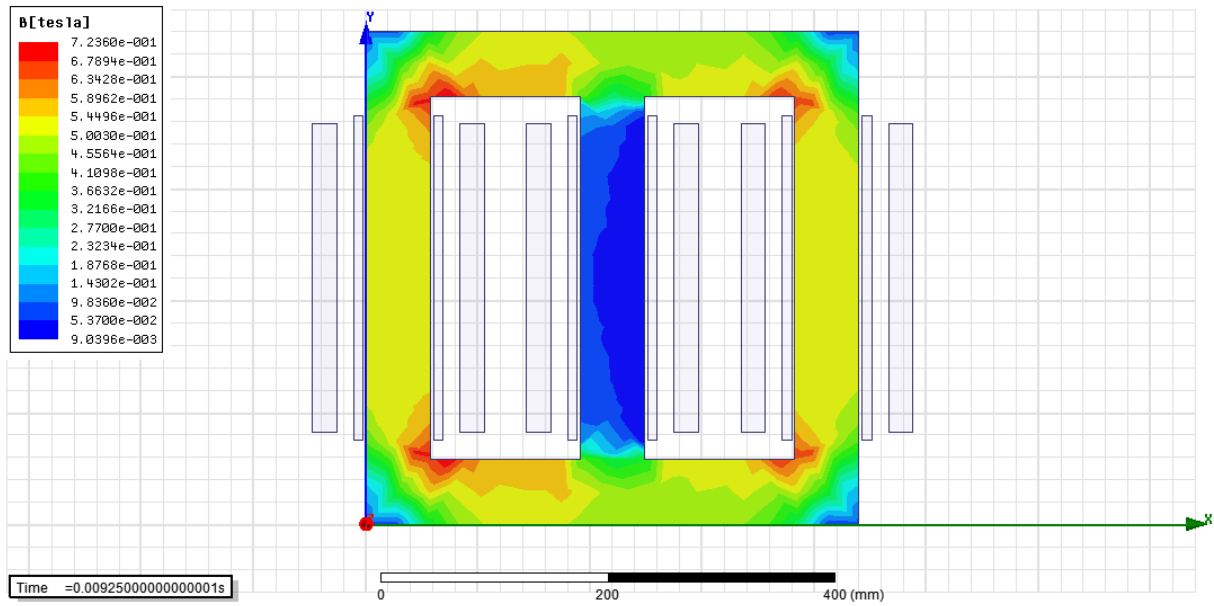


Figure IV.27 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_2=0.00925s$

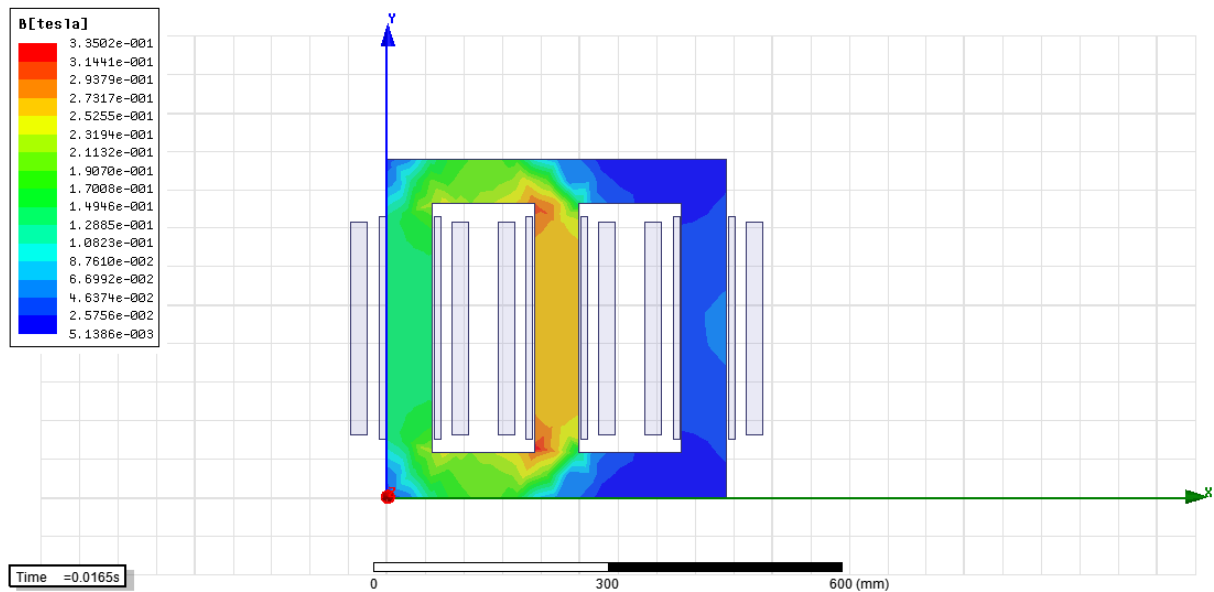


Figure IV.28 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_3=0.0165s$

➤ **Interprétation des figures**

- Les figures (IV.23), (IV.24) et (IV.25) illustrent la répartition du potentiel vecteur magnétique aux instants  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . Par identification les points  $m_4, m_2, m_5$  nous renseignent sur la valeur maximale de la tension qui correspond à la valeur nominale.

À  $t_1=0.00225s$  les valeurs positives du potentiel vecteur magnétique occupent la première colonne. La réparation des lignes de champs est donc maximale à ce niveau.

À  $t_2=0.00925s$  les lignes de champs sont maximales au niveau des arrêtes supérieures de la culasse mais cette fois-ci de valeurs négatives, ce qui indique un changement de sens d'orientation.

À  $t_3=0.0165s$  les valeurs positives du potentiel vecteur magnétique occupent la 3ème et 2ème colonne, Les lignes de champs y'est sont maximales. Cela veut dire qu'un deuxième changement de sens s'entame.

Les figures (IV.26), (IV.27) et (IV.29) représentent l'effet de pointes observé aux instants  $t_1, t_2, t_3$  par identification les points  $m_4, m_2, m_5$  montrés dans la figure (IV.22).

À  $t_1=0.00225s$  l'induction magnétique atteint des valeurs maximales au niveau des arrêtes intérieures de la deuxième fenêtre du transformateur. On remarque, une concentration intense de l'induction magnétique et cela s'explique par l'apparition de l'effet de pointes.

À  $t_2=0.00925s$  l'induction magnétique maximale s'élargit et se propage au niveau des deux fenêtres. On observe, une concentration intense au niveau des extrémités intérieures c'est le phénomène des pointes.

À  $t_3=0.0165s$  la concentration de l'induction magnétique maximale est disposée au niveau de deux extrémités de la colonne centrale avec diminution des valeurs. Le phénomène des pointes est toujours présent.

**APPLICATION 02**

**Partie I : Modélisation éléments finis du phénomène magnétostrictif**

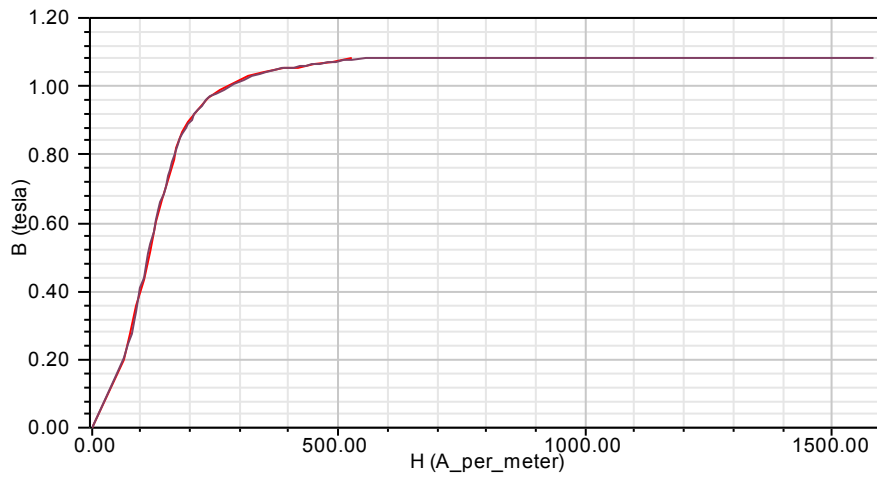
**Modèle magnétostrictif utilisé**

$$\epsilon^{mst} = \beta_0 \cdot B^2 + \beta_1 \cdot B^4 \quad (IV.I.1)$$

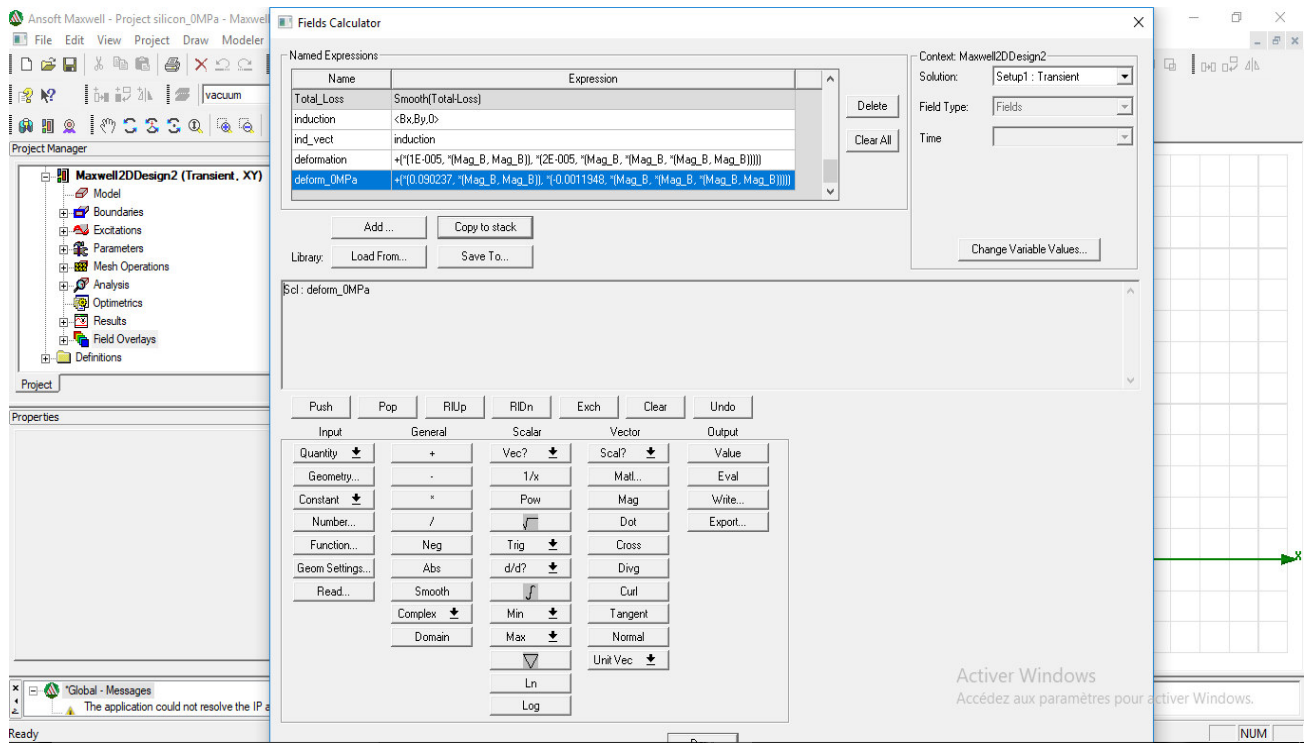
Avec  $\beta_0, \beta_1$  constantes prenant les valeurs données dans le tableau si dessous

Modèles	0 Mpa	-19 MPa	-39 MPa	-55MPa	-74MPa
$\beta_0$	9.0237e-2	-8.4618e-3	-1.00034e-02	-1.0664285e-3	7.848335e-005
$\beta_1$	-1.1948e-3	-1.2617e-3	-1.052388e-03	-3.1529358e-4	-1.02595e-004

**Tableau IV.4 Valeurs des constantes  $\beta_0, \beta_1$ [26]**



FigureIV.I. 01 Courbe d’hysterisis du Fe\_Si pour la contrainte de 0MPa



FigureIV.I.02 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell

I.1 Distribution de la déformation

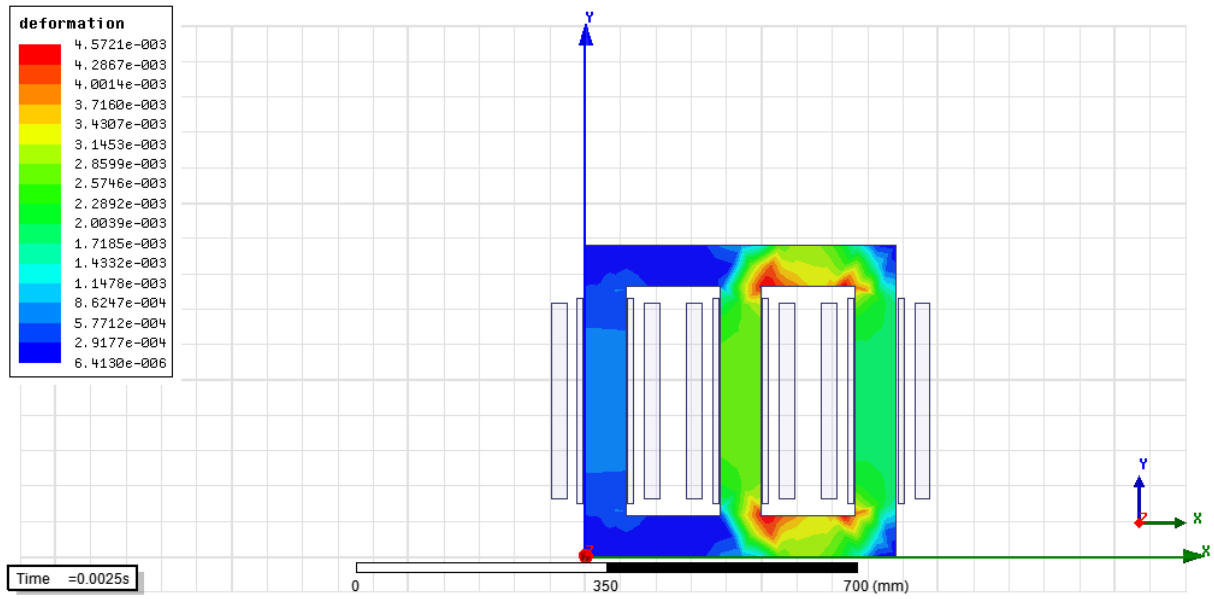


Figure IV.I.03 Distribution de la déformation à  $t = 0.0025s$

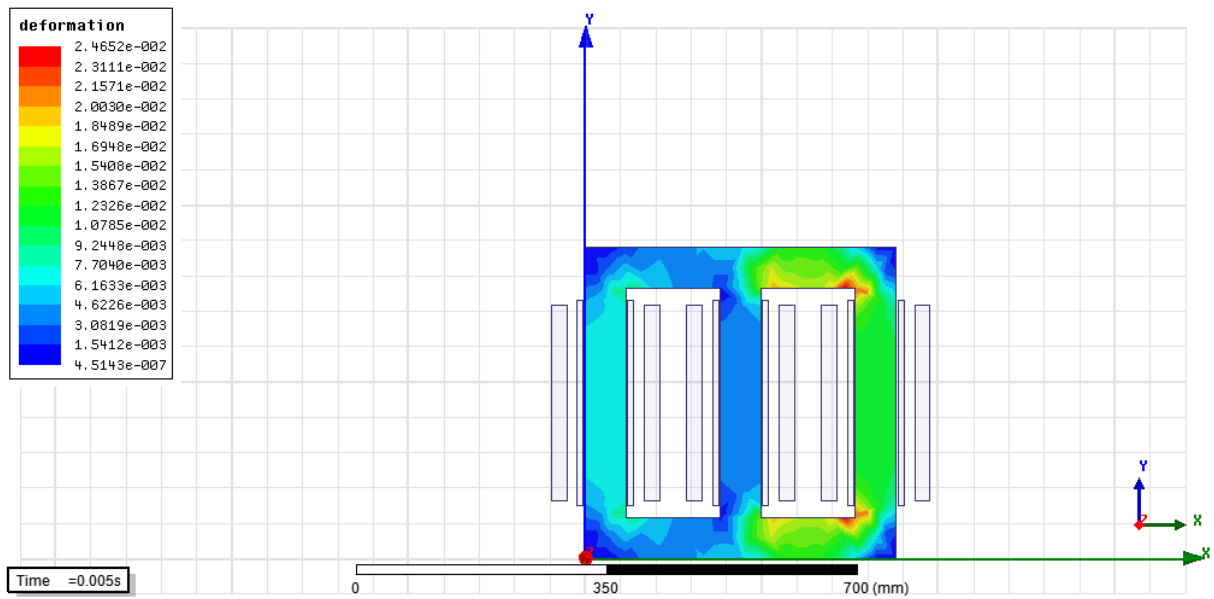


Figure IV.I.04 Distribution de la déformation à  $t = 0.005s$

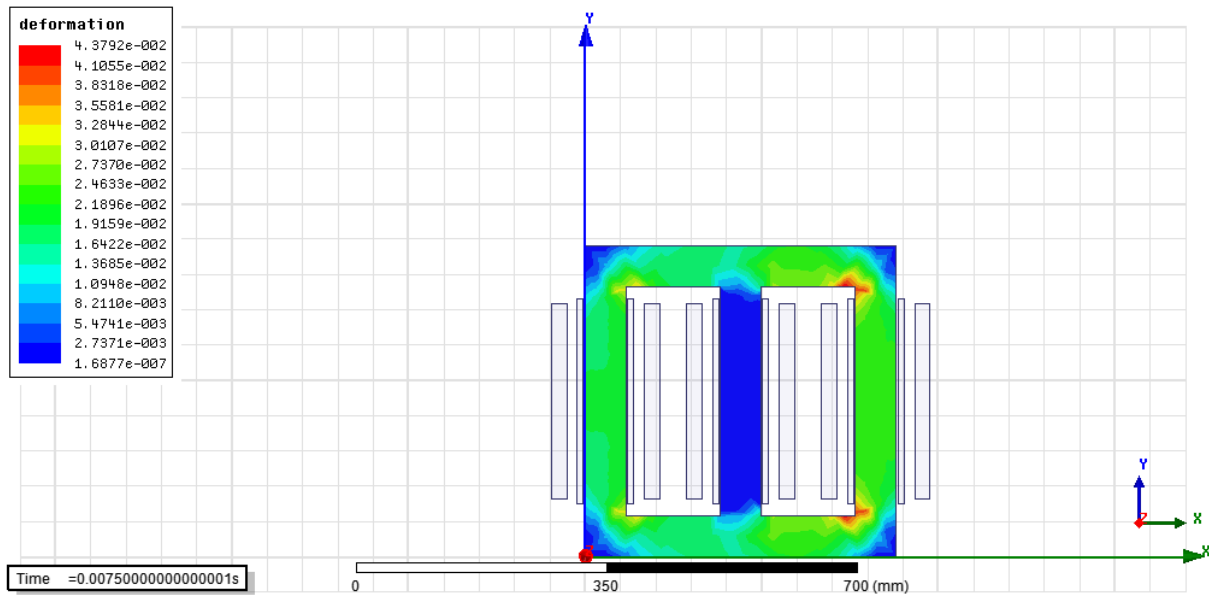


Figure IV.I.05 Distribution de la déformation à  $t = 0.0075s$

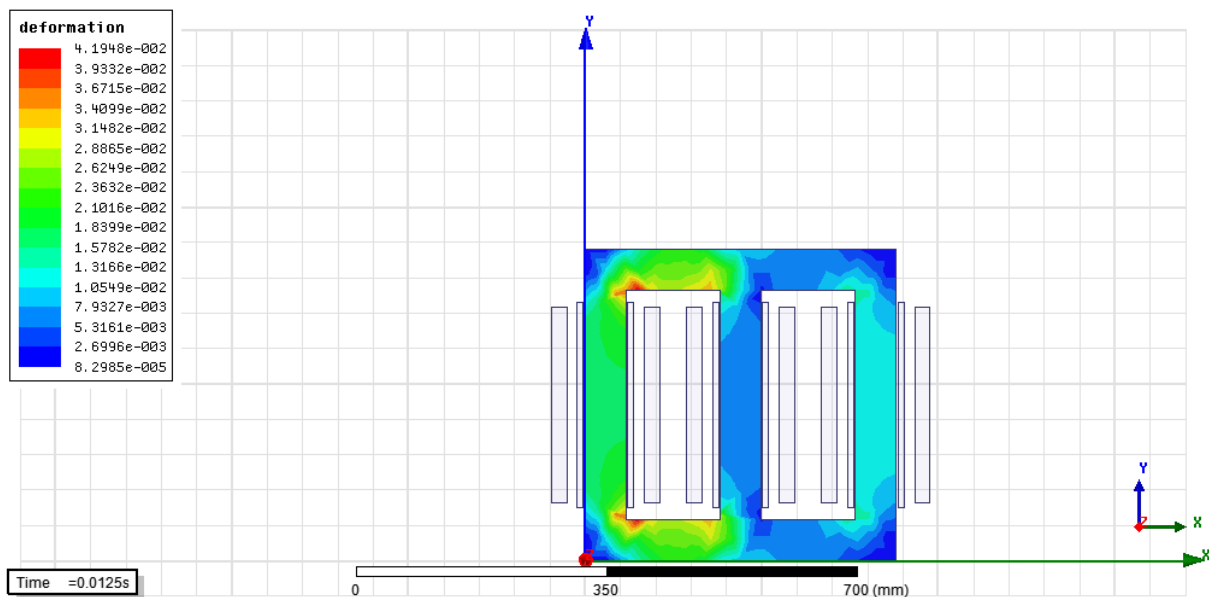


Figure IV.I.06 Distribution de la déformation à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I.01) caractérise la courbe d’hystérésis du matériau fer silicium intégrée dans Maxwell 2D pour une contrainte de 0Mpa.

Après avoir établi la formulation mathématique du problème représenté en figure (IV.I.02), nous avons pu obtenir la répartition de la déformation pour différents instants allant de 0.0025s à 0.0125s avec une période  $T=0.02s$ .

On remarque que la déformation varie en fonction du temps, à  $t = 0.0025$  elle atteint sa valeur maximale et s'intensifie au niveau des arrêtes intérieures de la deuxième fenêtre du transformateur.

À partir de  $t=0.005s$  la distribution de la déformation se propage au niveau de toute la culasse magnétique avec diminution de sa valeur maximale, celle-ci change de location a  $t=0.0125s$  et se canalise au niveau des arrêtes intérieures de la première fenêtre du transformateur.

### I.2 Potentiel vecteur magnétique A

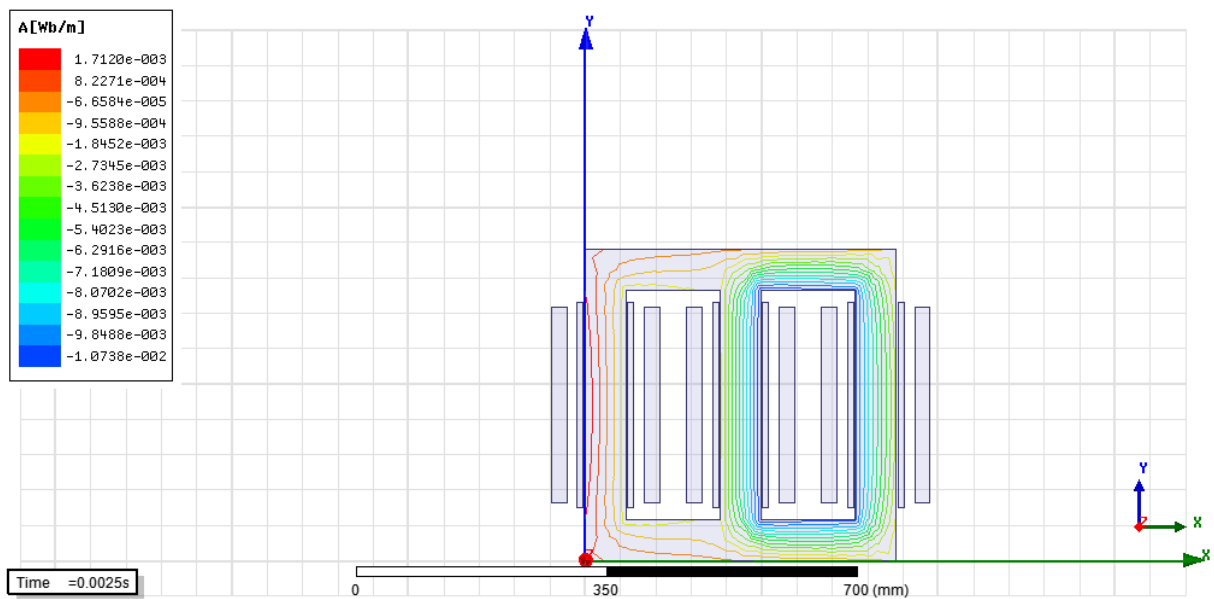


Figure IV.I.07 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0025s$ .

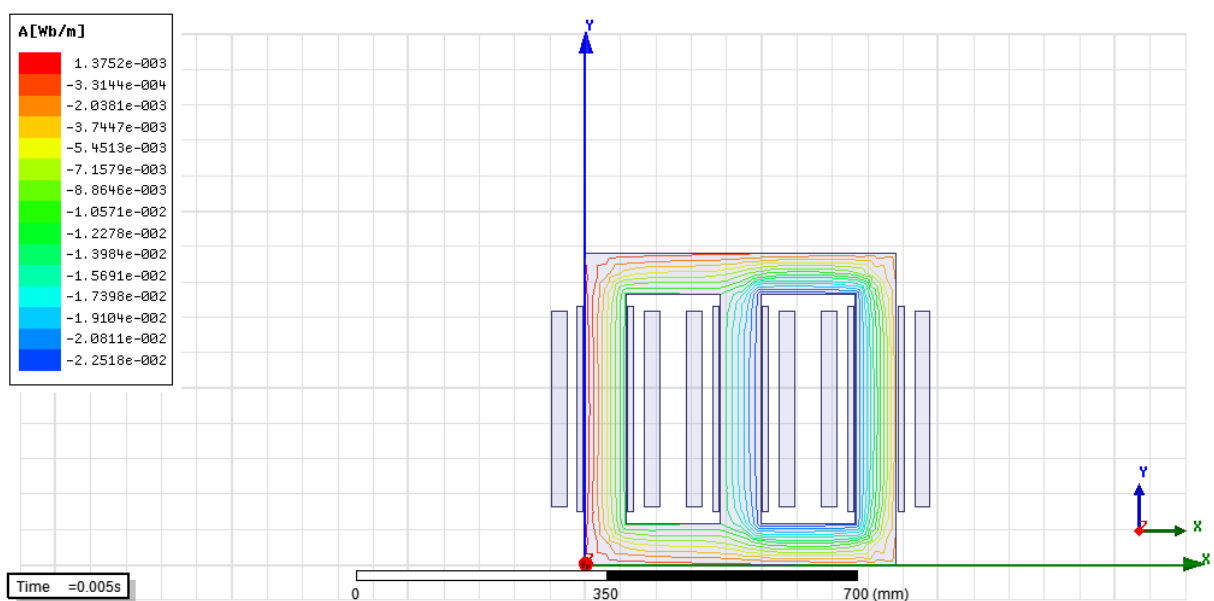


Figure IV.I.08 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$

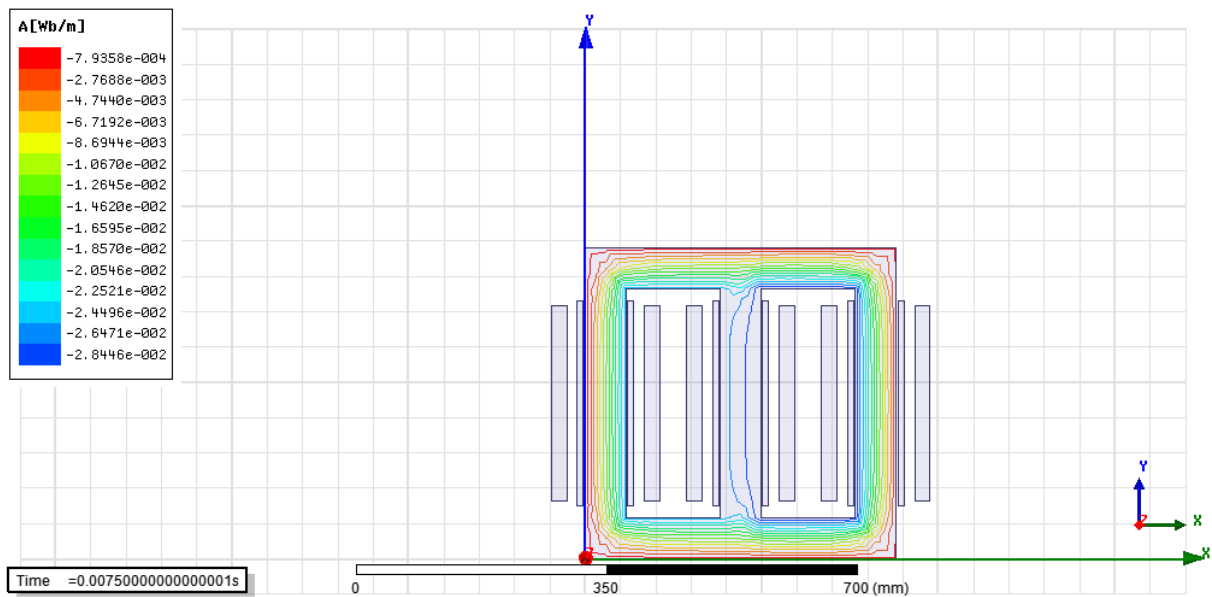


Figure IV.I.09 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0075s$

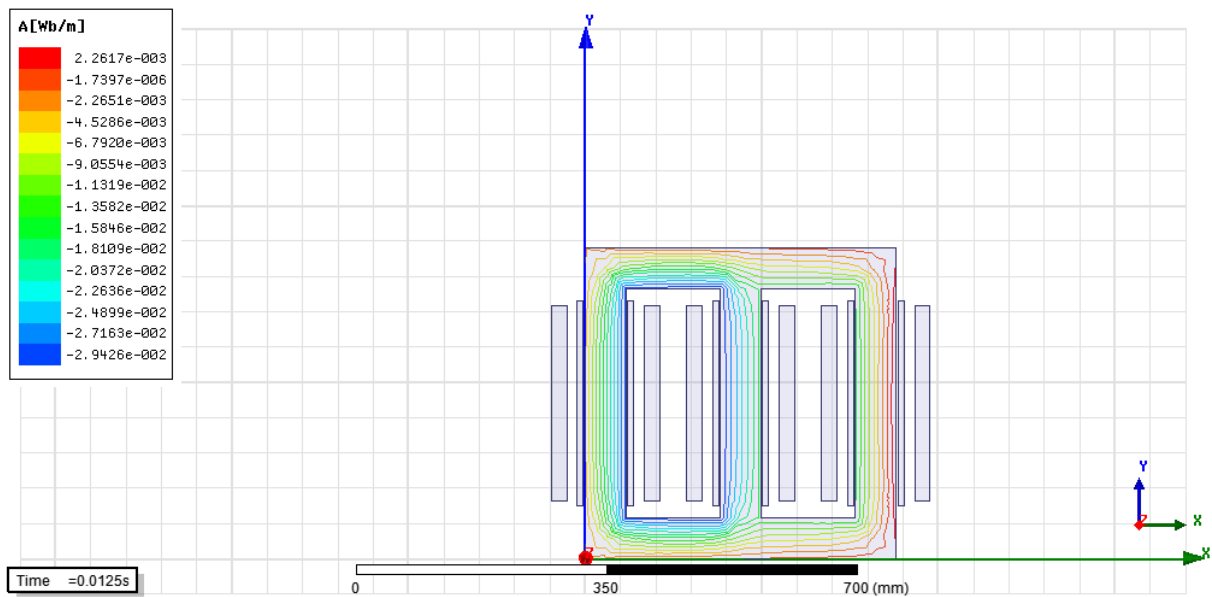


Figure IV.I.10 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les figures (IV.I.7), (IV.I.8), (IV.I.9) et (IV.I.10) illustrent la répartition du potentiel vecteur magnétique à différents instants donnés.

Les valeurs positives du potentiel vecteur magnétique en un premier temps occupent la première colonne. Cela indique une forte canalisation des lignes de champs.

À  $t = 0.005s$ , le potentiel vecteur magnétique s'étend le long de la culasse toujours avec une valeur maximale positive.

À  $t = 0.0075s$ , le potentiel se canalise dans toute la culasse mais avec des valeurs maximales négatives.

À  $t = 0.0125s$ , le potentiel atteint une valeur maximale positive au niveau de la troisième colonne.

### I.3 Champ magnétique H

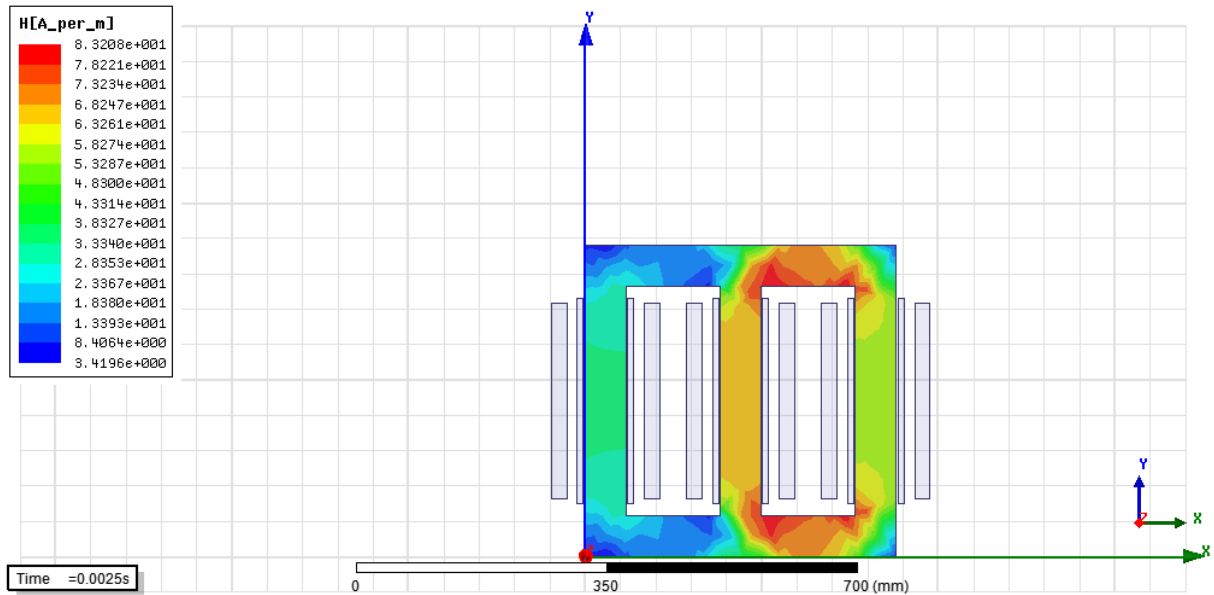


Figure IV.I.11 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$

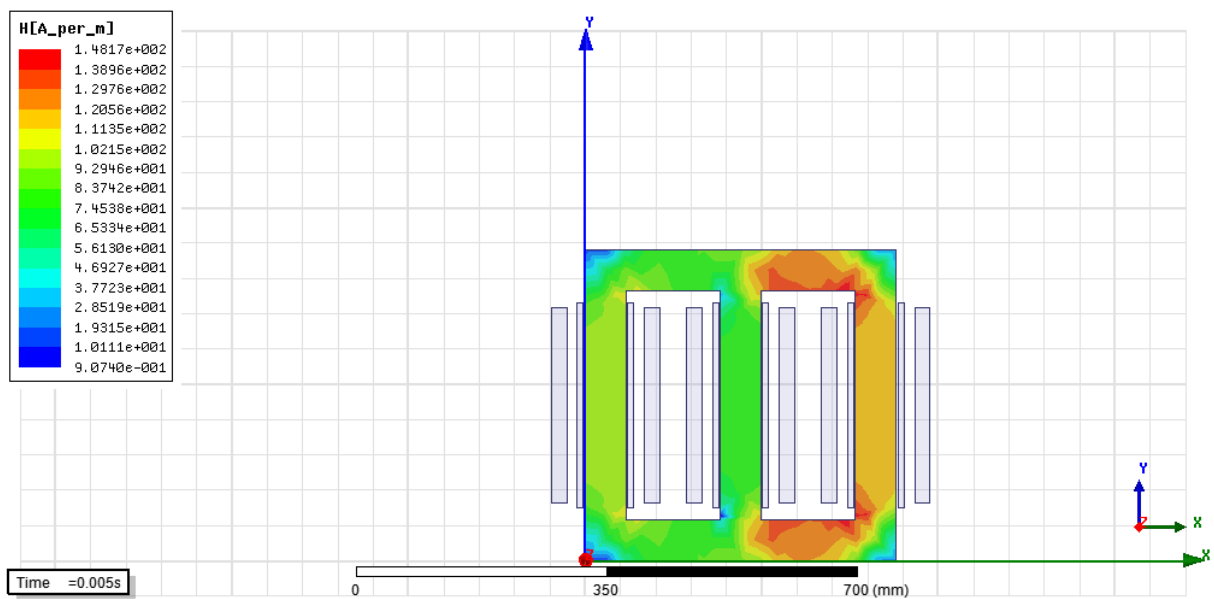


Fig12 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$

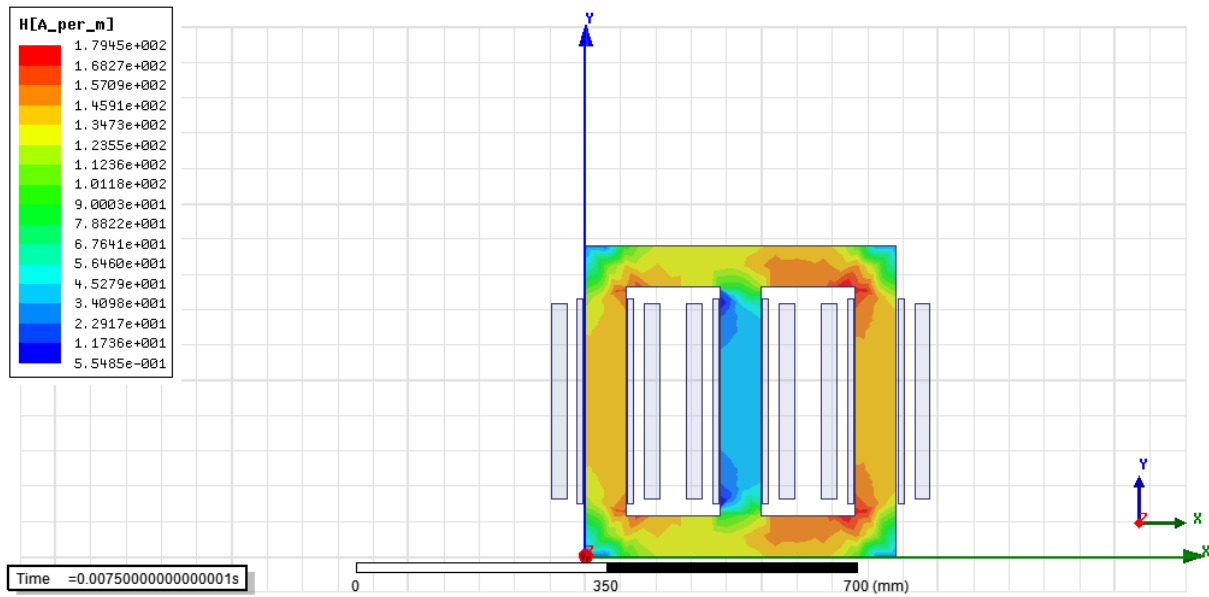


Figure IV.I.13 Distribution du champ magnétique H à t = 0.0075s

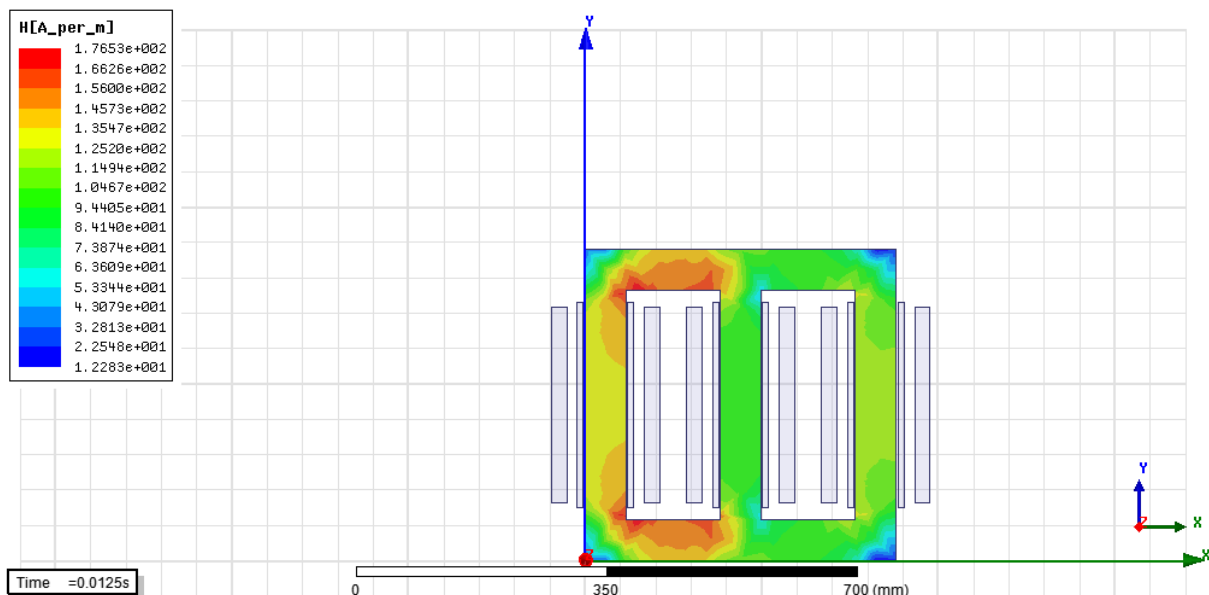


Figure IV.I.14 Distribution du champ magnétique H à t = 0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures (IV.I.11 à IV.I.14) illustrent la répartition du champ magnétique H.

À t = 0.0025s, le champ magnétique est important au niveau de la deuxième colonne et se canalise dans le coté droit du transformateur, atteignant une valeur maximale de l'ordre de  $8.3208 \cdot 10^{+001}$  [A /m].

À  $t = 0.005s$ , le champ magnétique se concentre au niveau des arrêtes intérieures de la deuxième fenêtre du transformateur et de la dernière colonne, avec une valeur maximale de  $H = 1.4817.10^{+002}[A/m]$ .

À  $t = 0.0075s$ , le champ magnétique se propage et s'intensifie dans tout le circuit magnétique, avec une valeur maximale accru  $H=1.7445.10^{+002}[A/m]$ .

À  $t=0.0125s$ , la distribution du champ magnétique s'est réorientée vers la première colonne et les arrêtes intérieures du côté gauche du transformateur avec diminution de la valeur maximale.

### I.4 Induction magnétique B

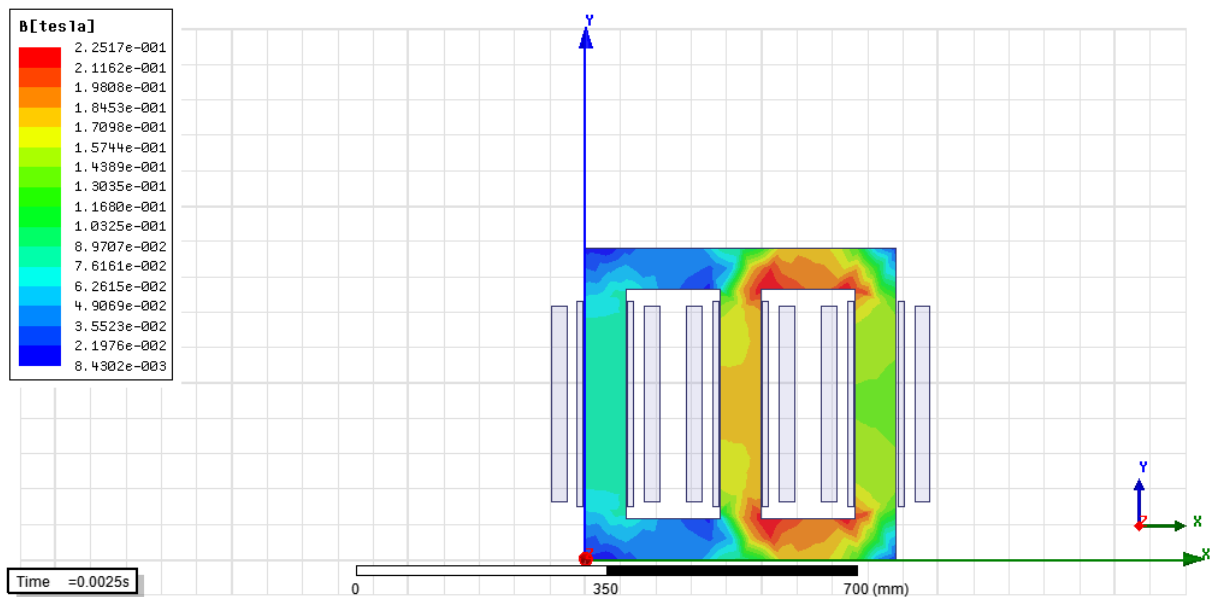


Figure IV.I.15 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$

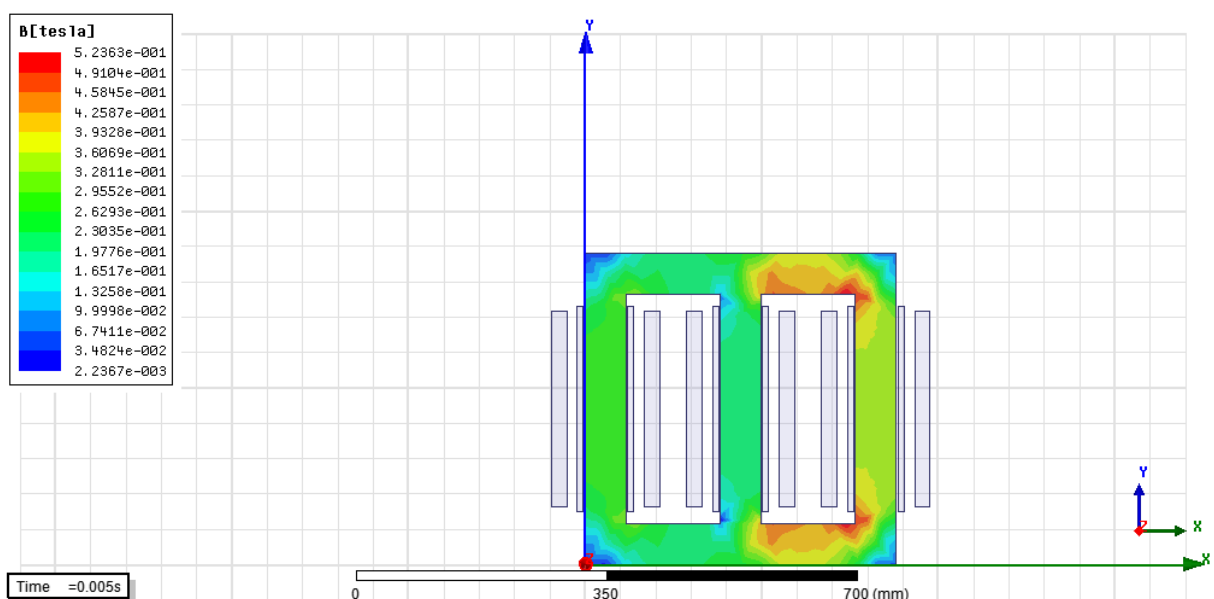


Figure IV.I.16 Induction magnétique à  $t = 0.005s$

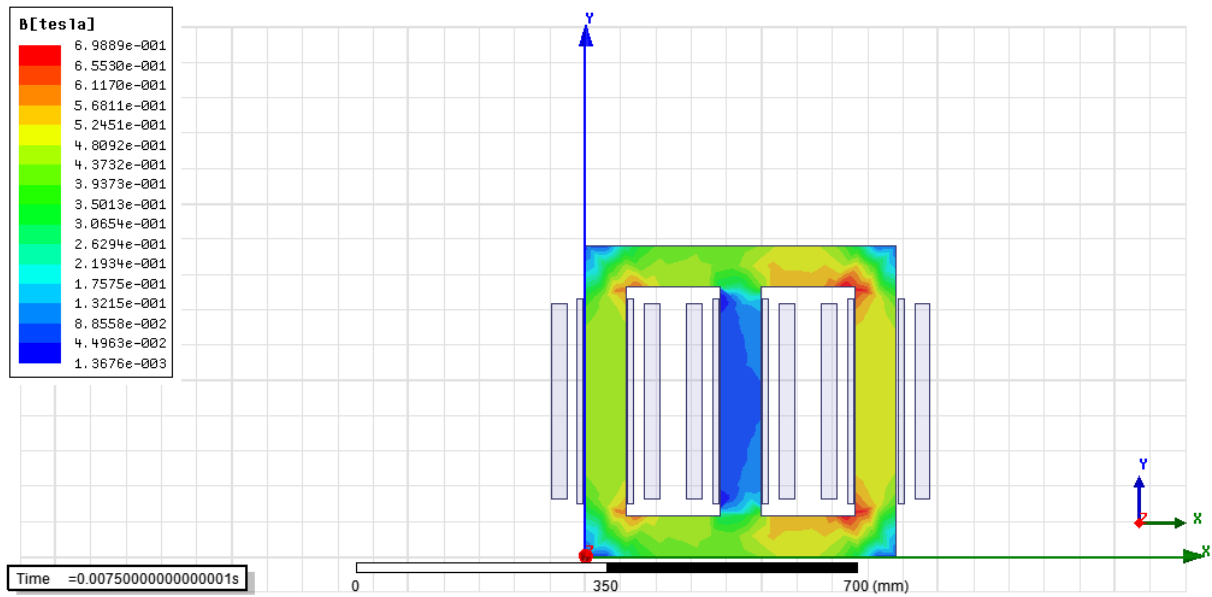


Figure IV.I.17 Induction magnétique à  $t = 0.0075s$

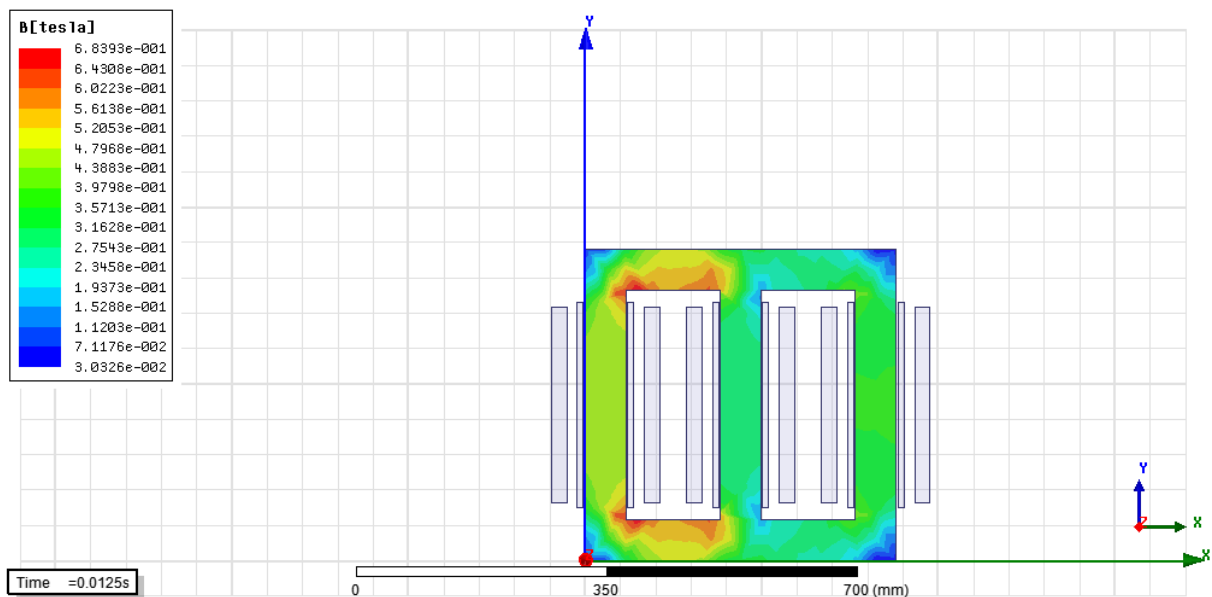


Figure IV.I.18 Induction magnétique à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les figures (IV.I.15 à IV.I.18) représentent la répartition de l'induction magnétique dans la culasse.

À  $t = 0.0025s$ , l'induction magnétique atteint des valeurs maximales au niveau des arrêtes intérieures de la deuxième fenêtre du transformateur avec de valeurs remarquables. On observe, une concentration intense de l'induction magnétique cela s'explique par l'apparition de l'effet de pointes.

À  $t = 0.005s$ , l'induction magnétique occupe toute la culasse magnétique à l'instant  $t=0.0075s$  au niveau des deux fenêtres. On observe, une concentration intense dans les extrémités intérieures c'est le phénomène des pointes.

À  $t=0.0125s$ , la concentration de l'induction magnétique maximale est disposée au niveau des arrêtes de la première fenêtre du transformateur avec diminution des valeurs. Le phénomène des pointes est toujours présent.

**I.5 Densité des forces**

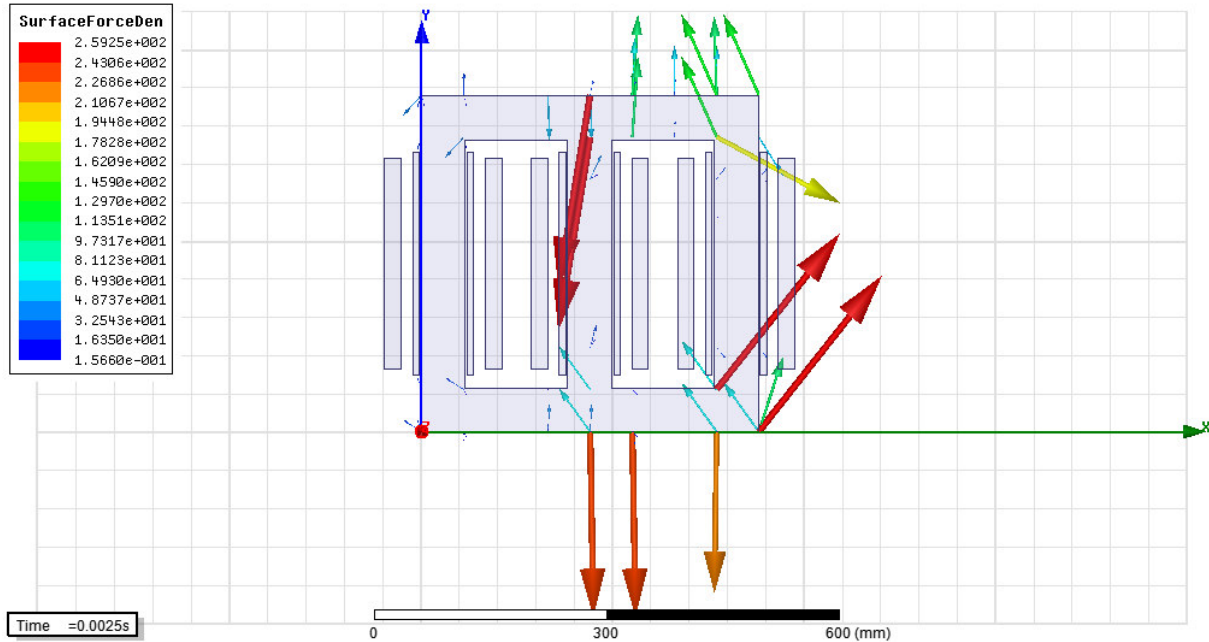


Figure IV.I.19 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0025s$

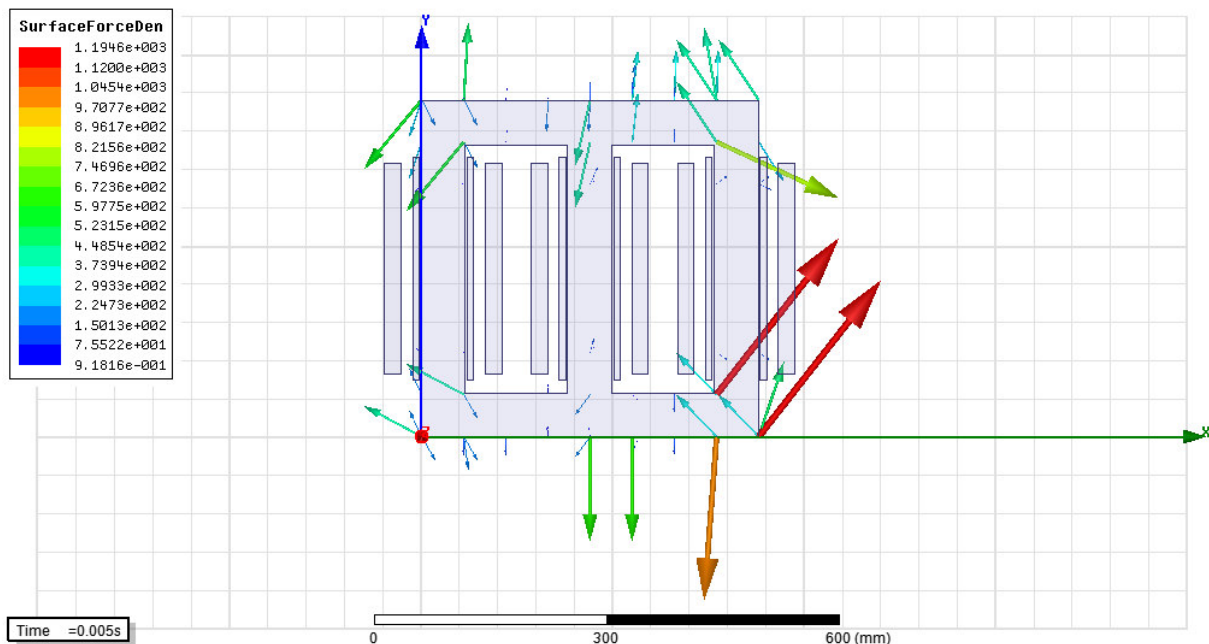


Figure IV.I.20 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.005s$

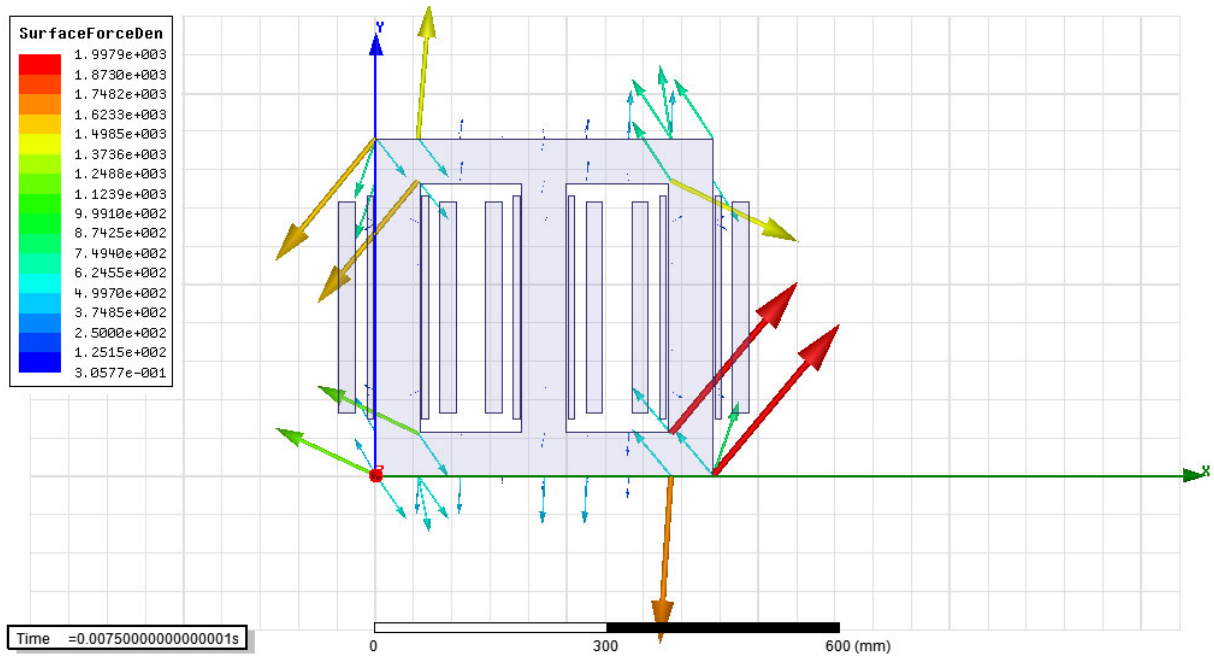


Figure IV.I.21 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0075s$

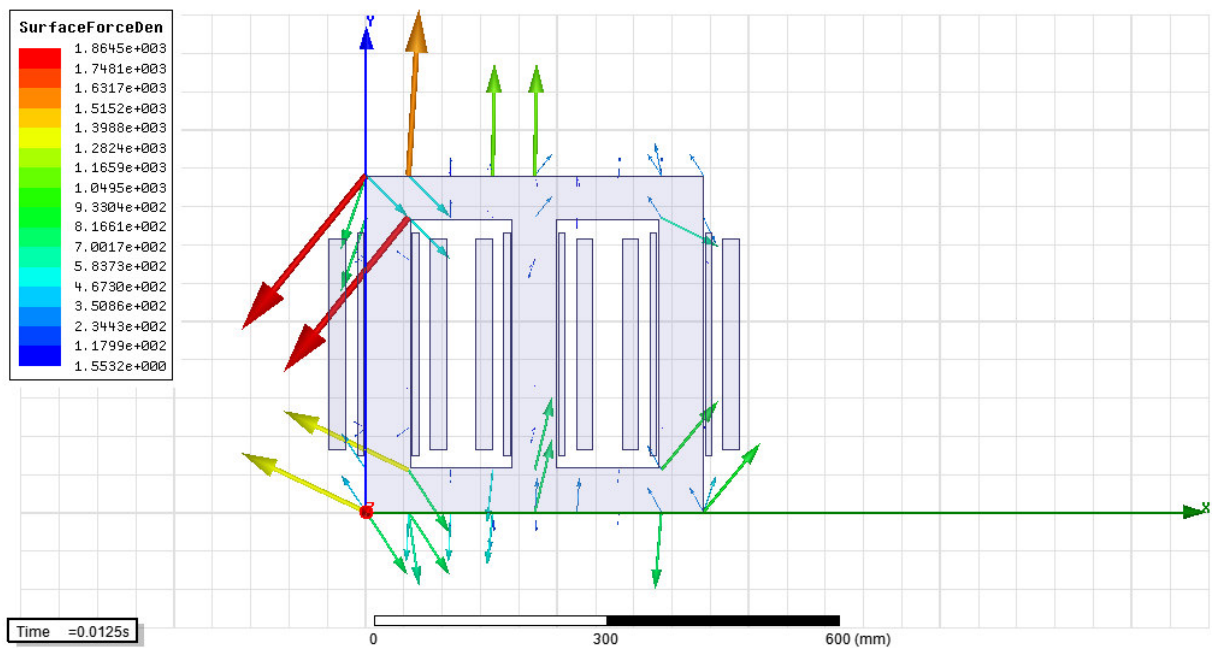
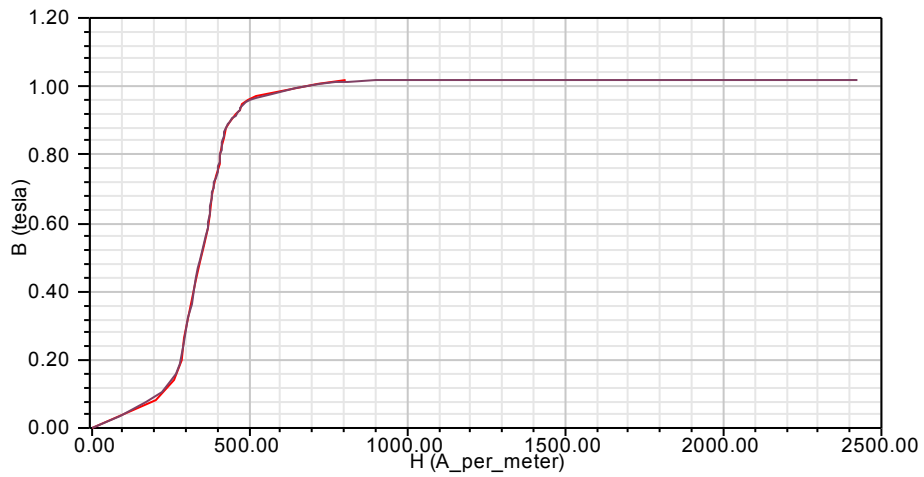


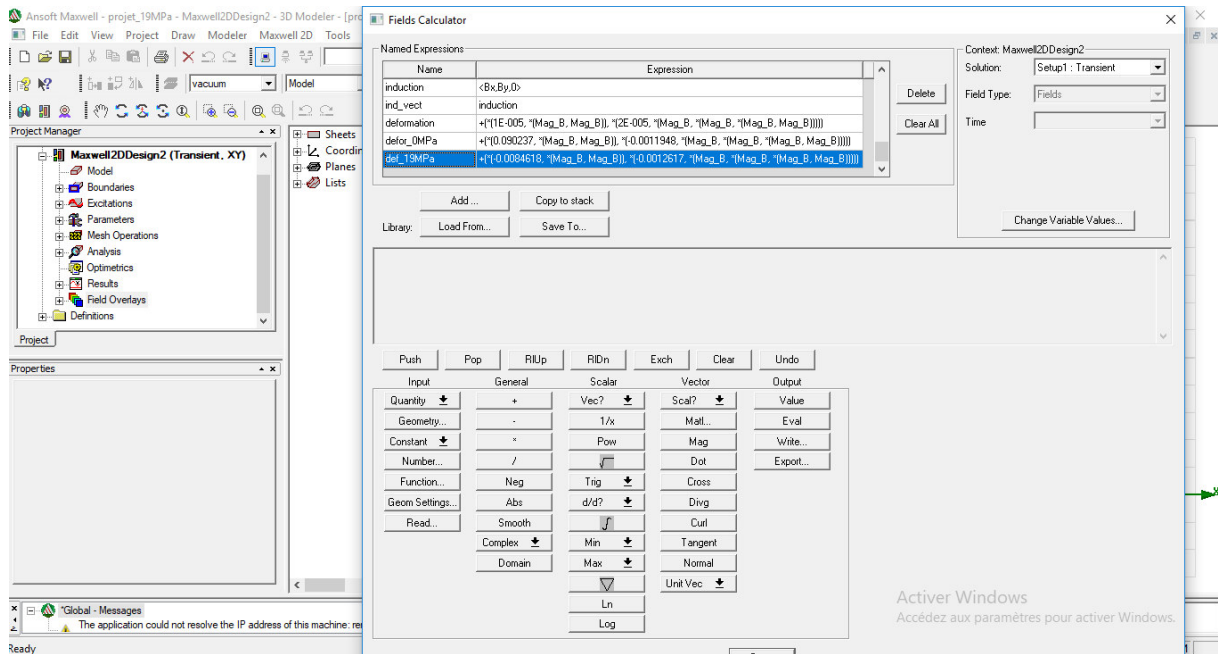
Figure IV.I.22 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les vecteurs de la densité des forces magnétiques se trouvent dans des angles intérieurs de la culasse leur orientation est vers l'extérieur, puis ils se répandent dans toute la culasse gardant leur sens et avec augmentation de la densité puis un changement de sens des vecteurs aura lieu et en fin ils rejoindront leur place initiale où ils se stabilisent en changeant leurs sens.



FigureIV.I.23 Courbe d’hysterisis du Fe\_Si pour la contrainte de -19Mpa



FigureIV.I.24 Formulation mathématique pour -19 Mpa

1. Déformation de magnétostriction

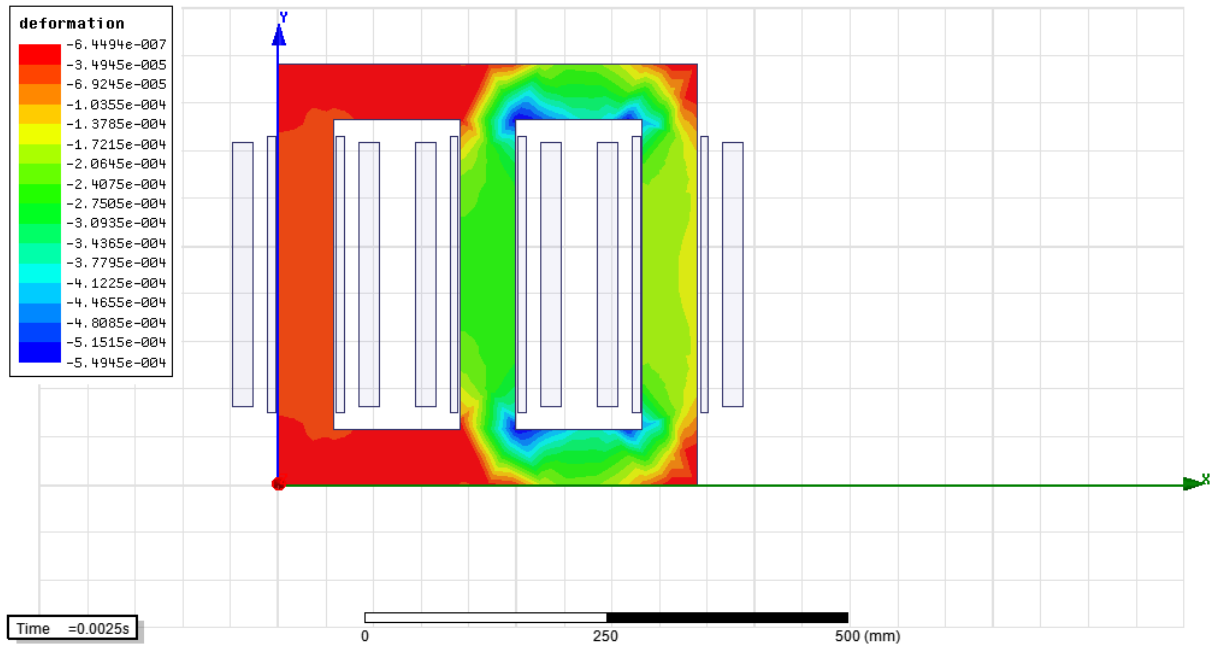


Figure IV.I.25 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$

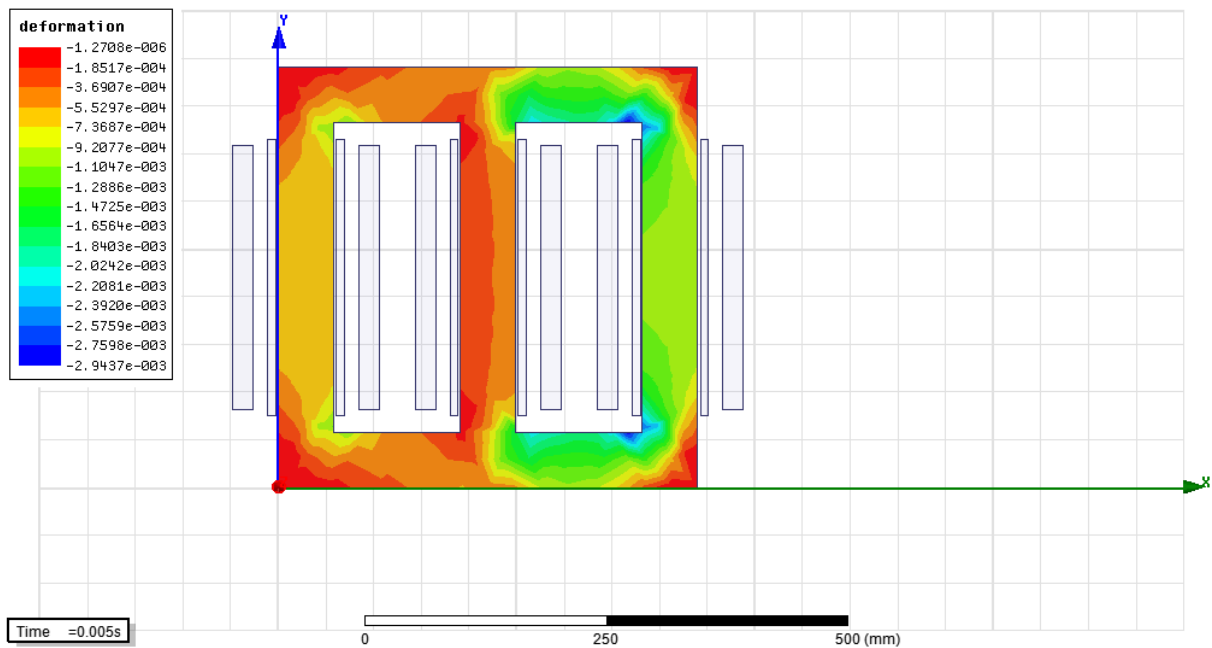


Figure IV.I.26 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$

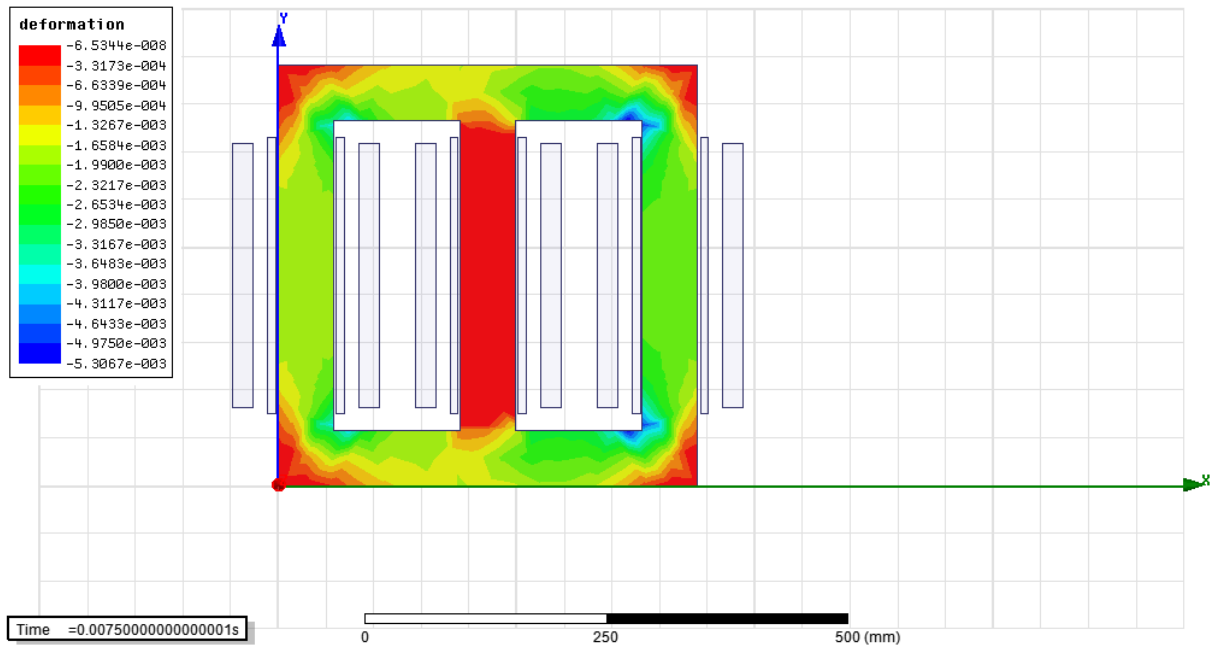


Figure IV.I.27 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$

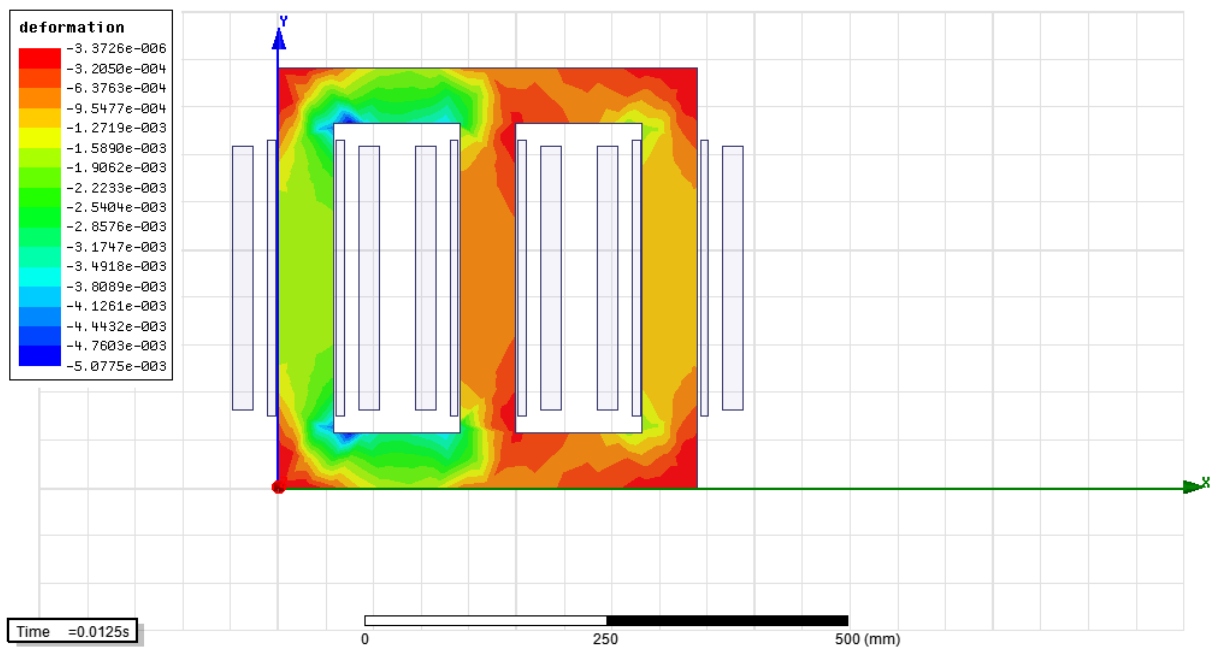


Figure IV.I.28 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I.23) caractérise la courbe d’hystérésis du matériau fer silicium réalisée sous maxwell pour une contrainte de -19Mpa.

La formulation mathématique du problème est représentée en figure (IV.I.24).

On remarque une intensification dans la répartition de la déformation, qui atteint une valeur maximale à  $t = 0.0075s$  canalisée principalement au niveau des angles supérieurs du transformateur et de la colonne centrale.

## 2. Potentiel vecteur magnétique A

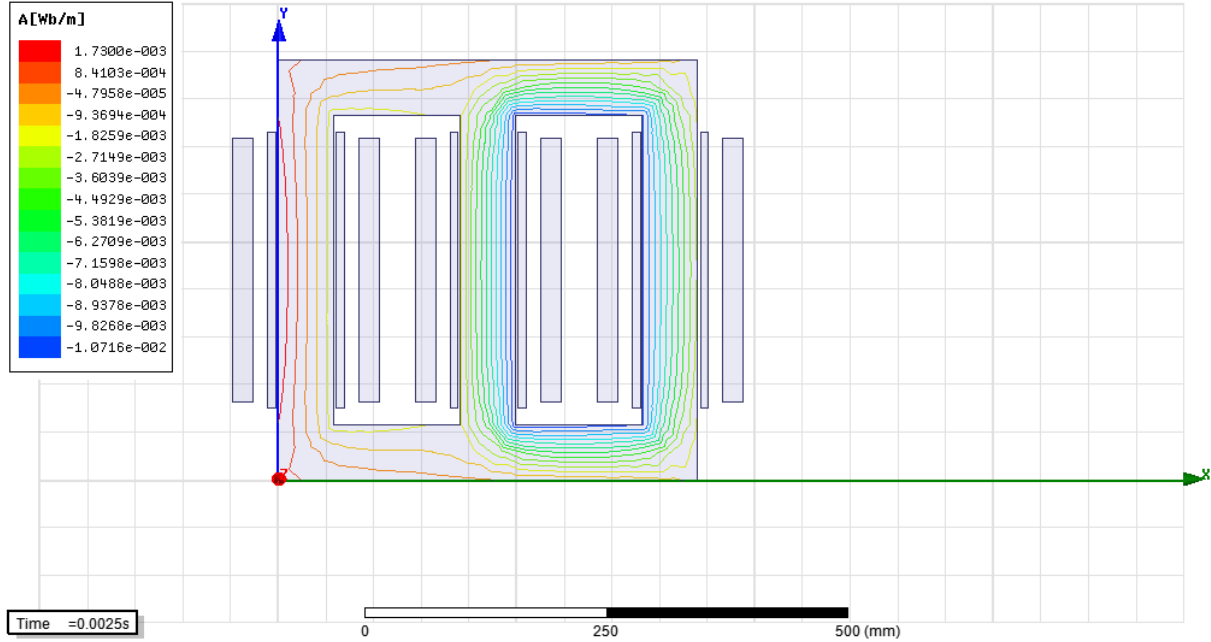


Figure IV.I.29 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0025s$

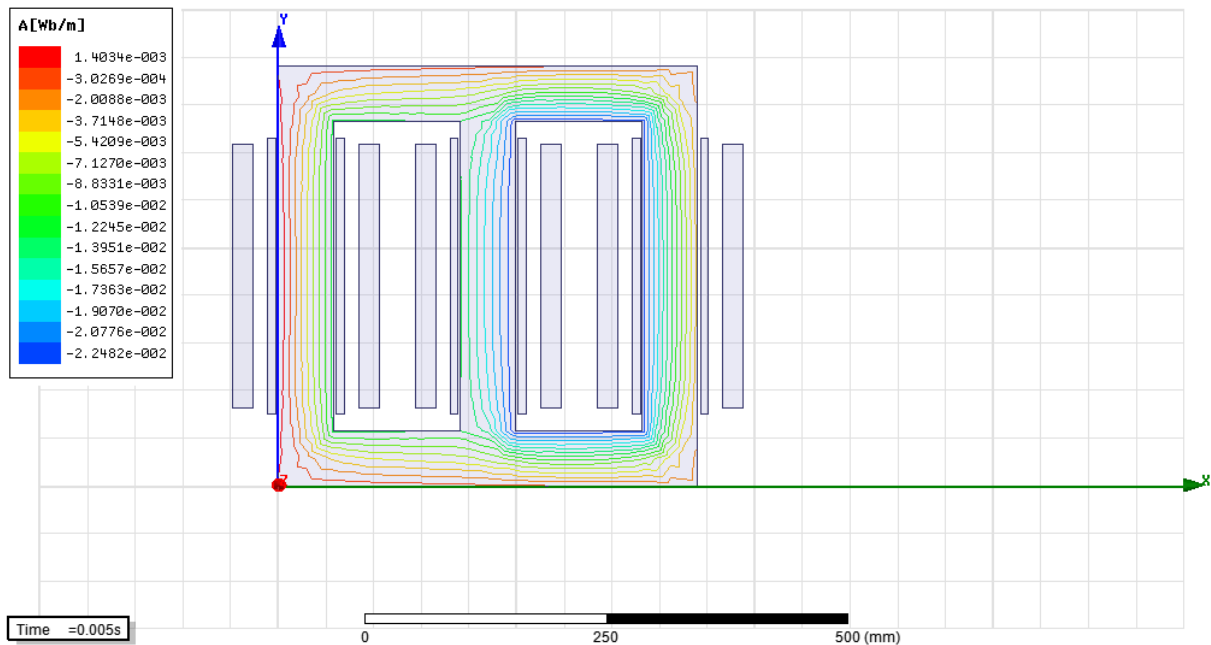


Figure IV.I.30 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$

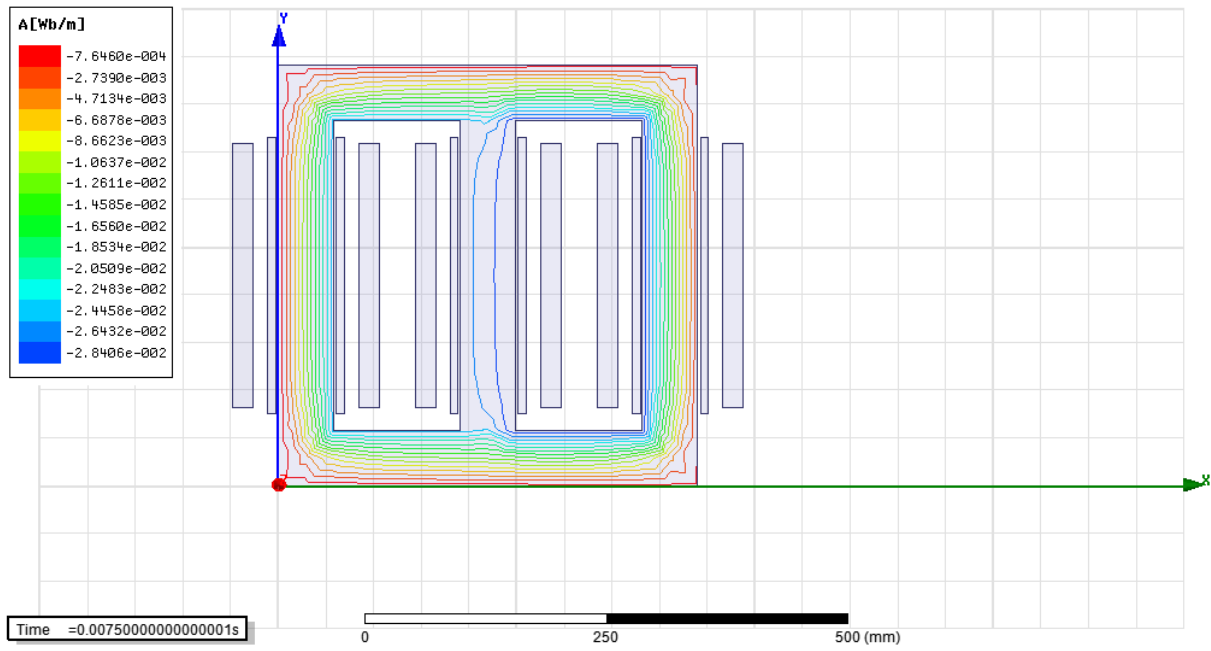


Figure IV.I.31 Distribution du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.0075s$ .

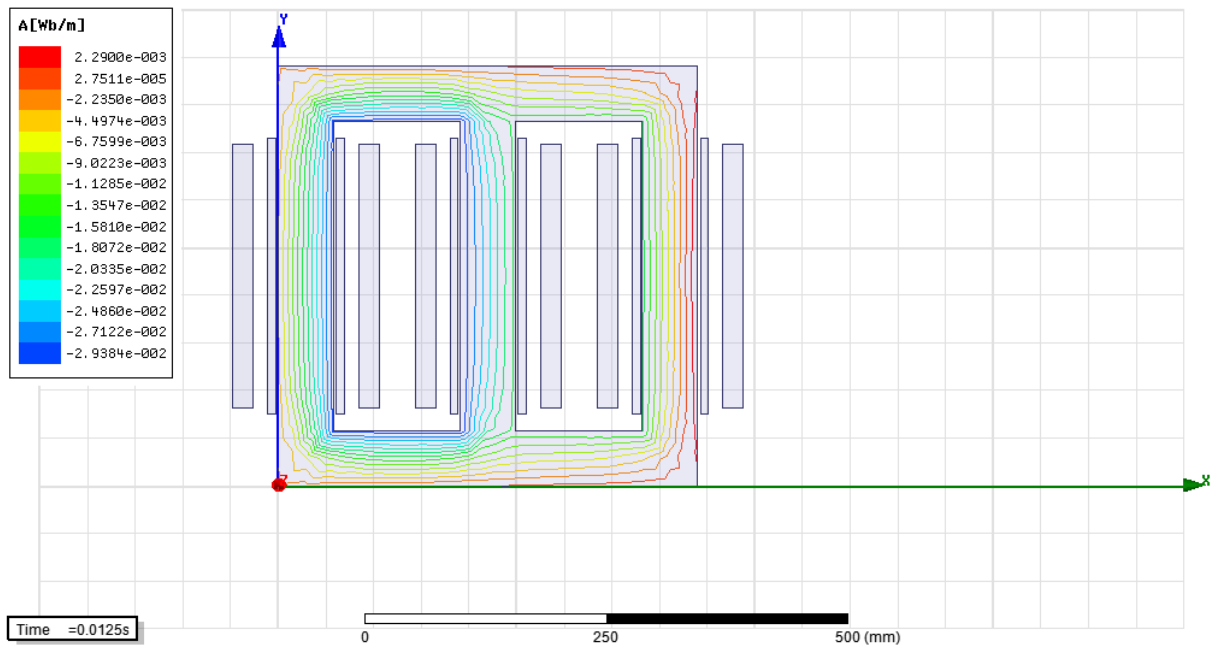


Figure IV.I.32 Distribution du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.0125s$

Les figures (IV.I.29 à IV.I.32) représentent la disposition du potentiel vecteur magnétique  $A$  au niveau de la culasse.

3. Champ magnétique H

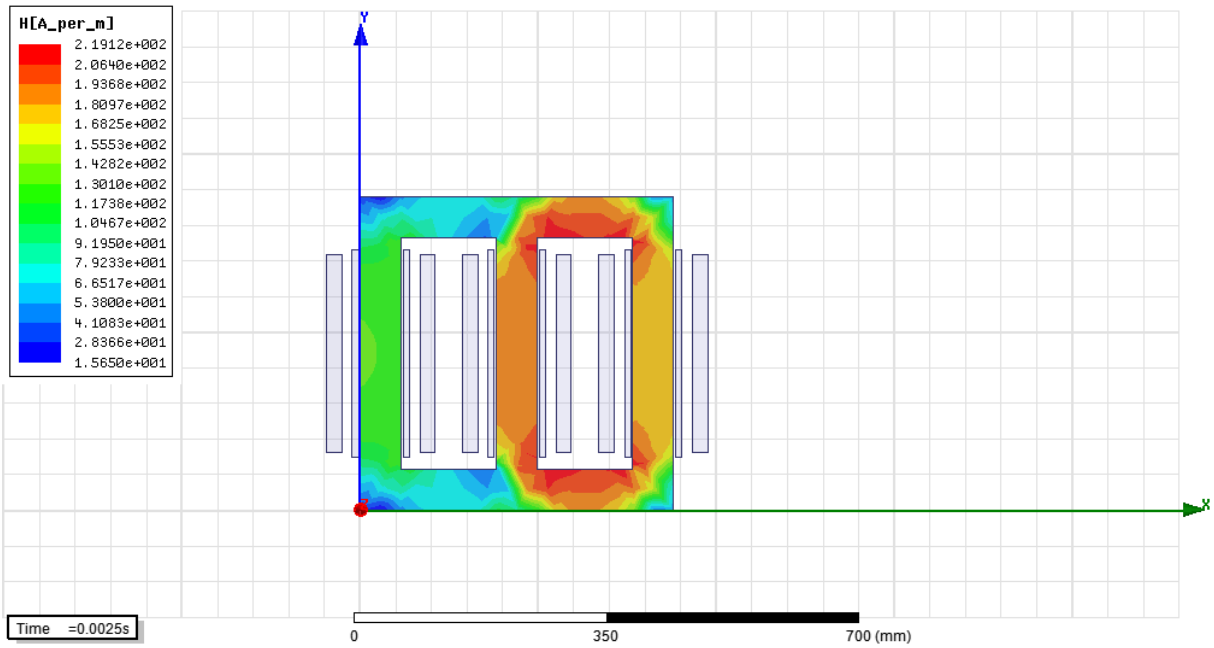


Figure IV.I.33 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$

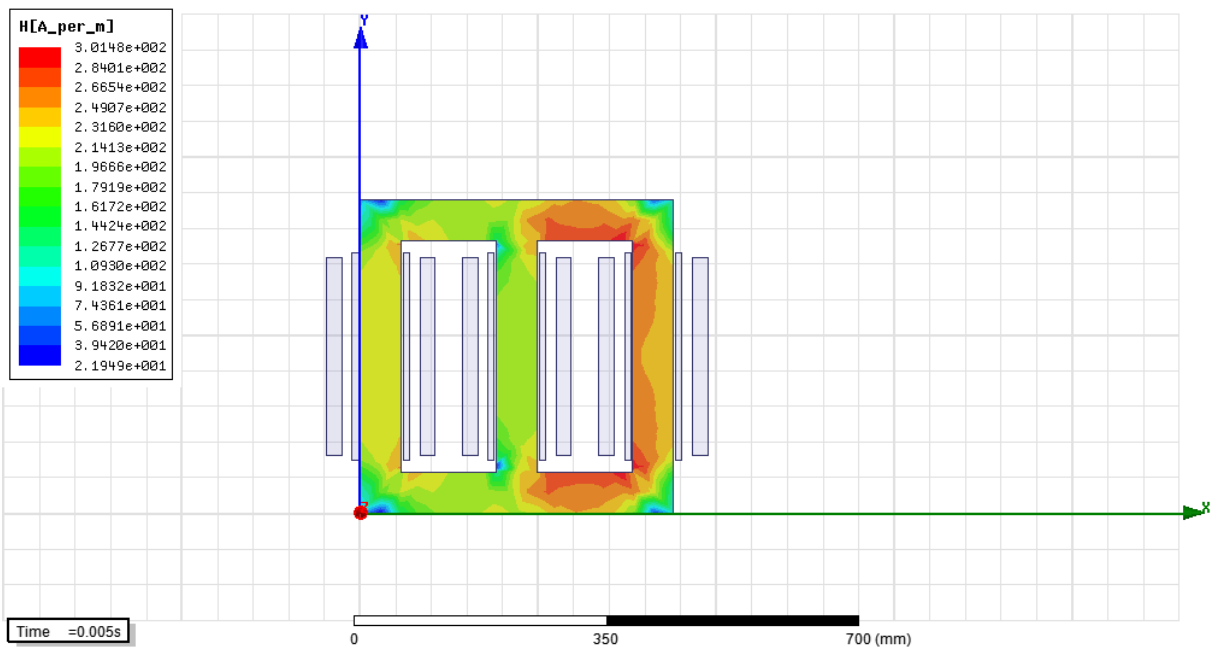


Figure IV.I.34 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$

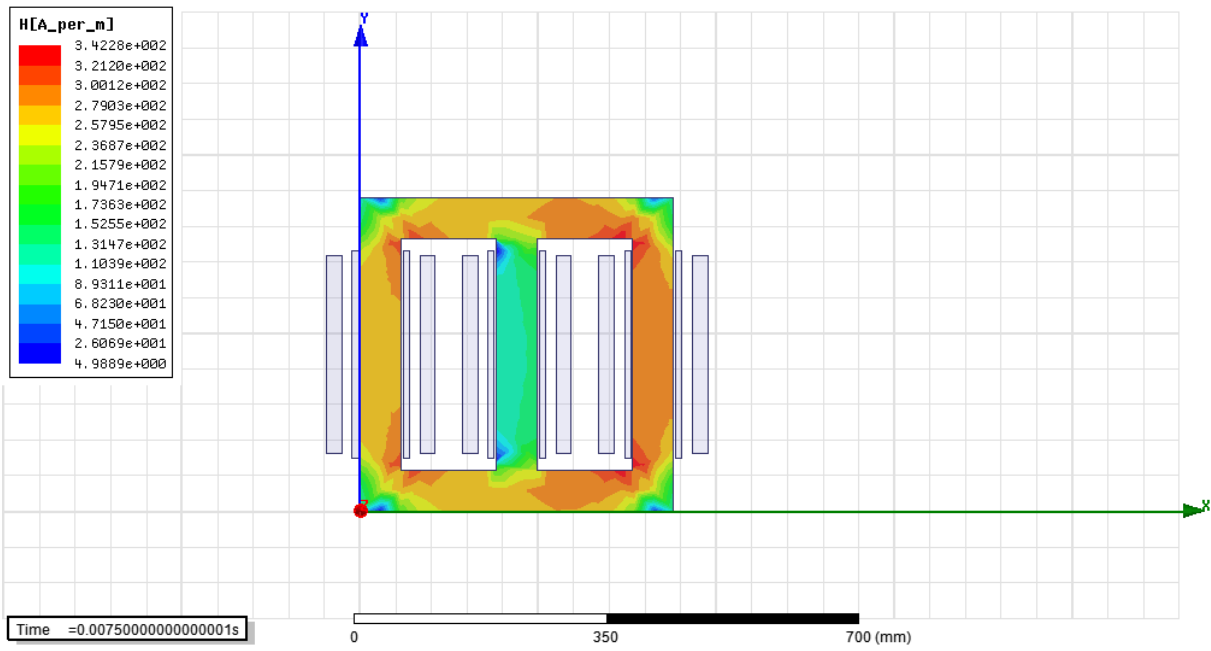


Figure IV.I.35 Distribution du champ magnétique H à t = 0.0075s

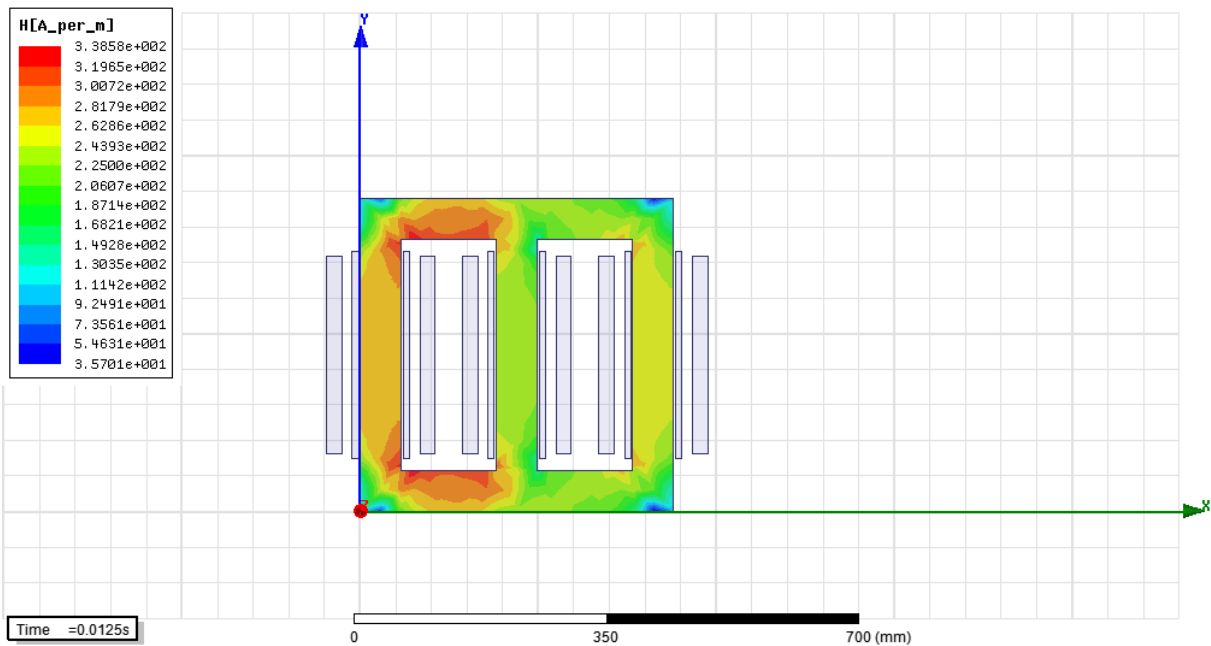


Figure IV.I. 36 Distribution du champ magnétique H à t = 0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent une augmentation de la valeur maximale du champ magnétique au niveau du circuit magnétique du transformateur, elle atteint  $3.4228 \cdot 10^{+002}$  [A/m] à t = 0.0075s.

4. Induction magnétique B

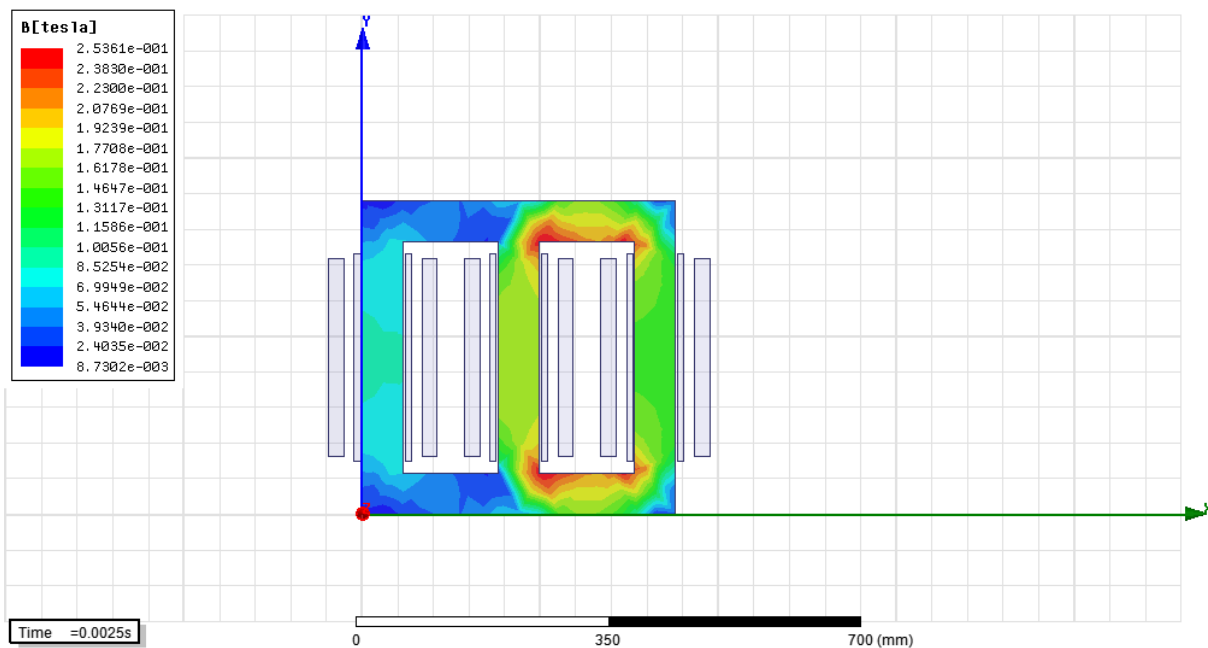


Figure IV.I.37 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$

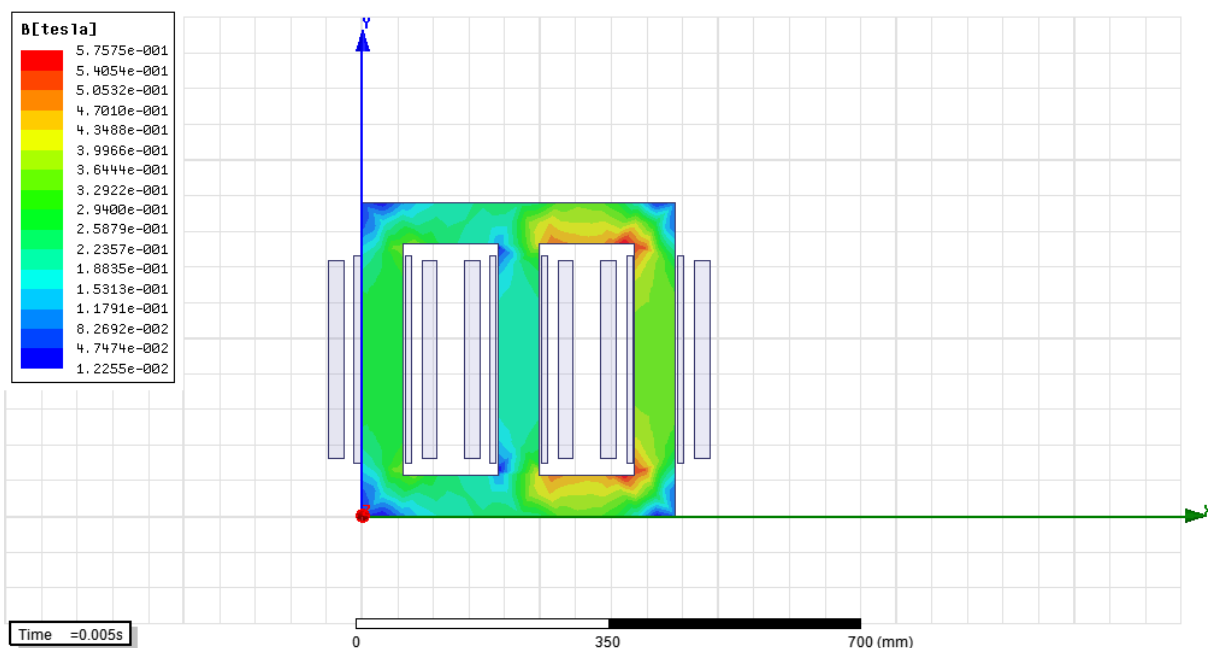


Figure IV.I.38 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$

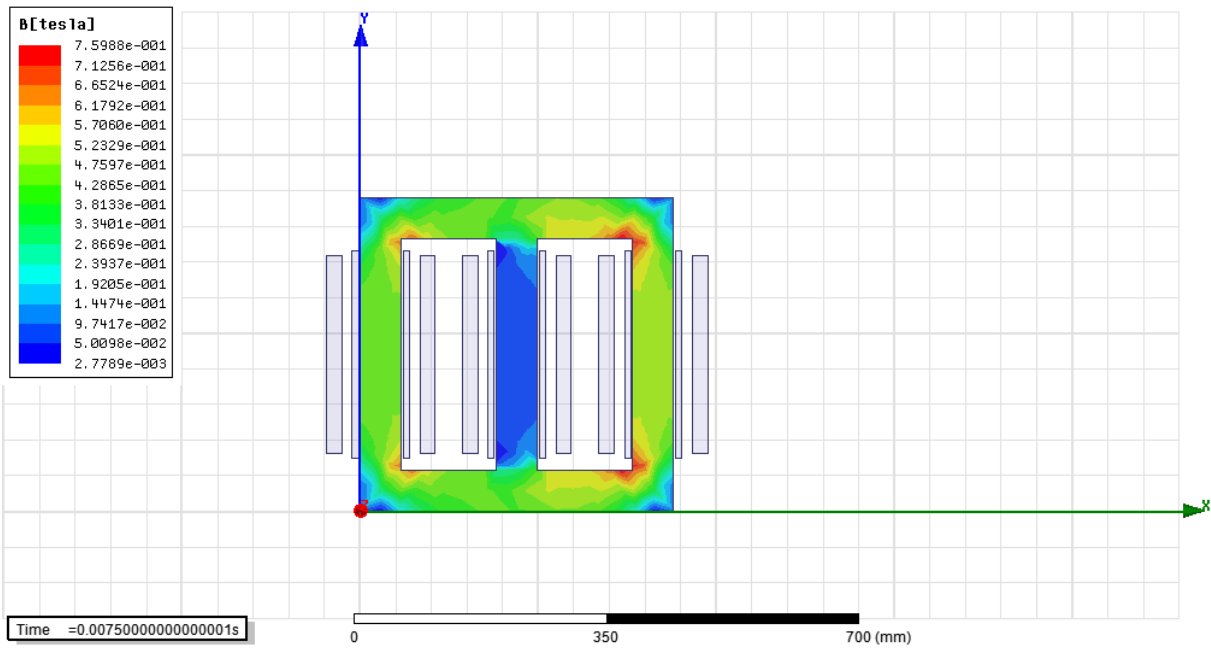


Figure IV.I.39 Induction magnétique B à t = 0.0075s

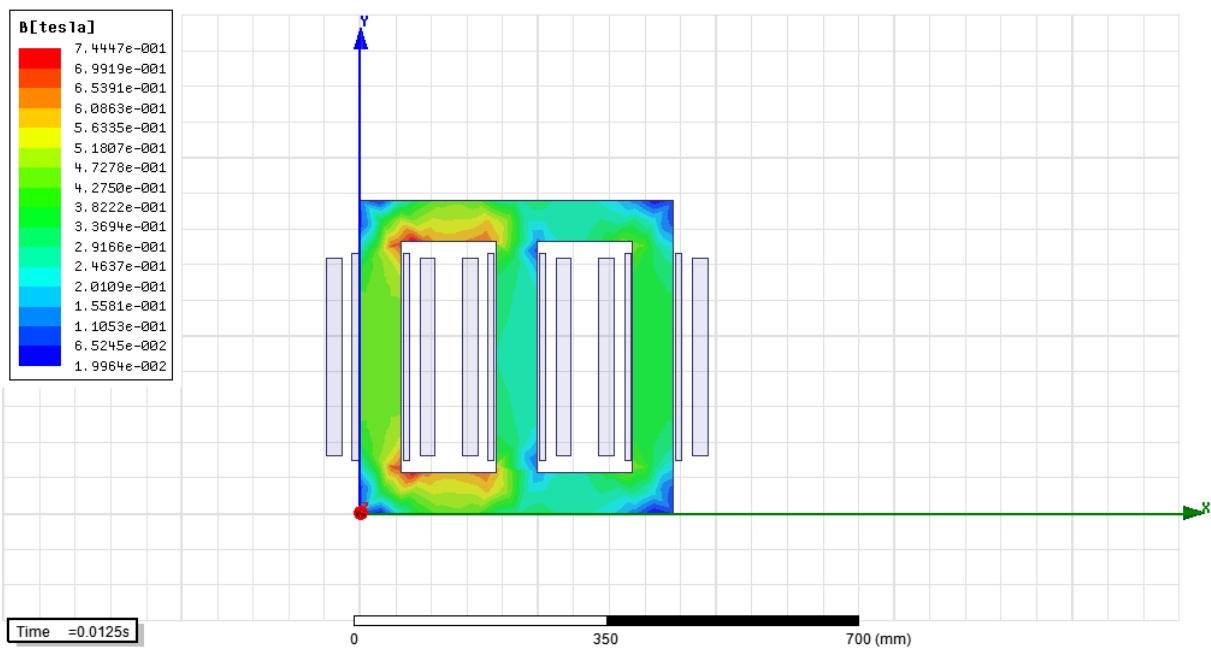


Figure IV.I.40 Induction magnétique B à t = 0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent une légère accentuation de la distribution de l'induction dans le circuit magnétique du transformateur, elle atteint une valeur maximale de l'ordre de  $7.5988 \cdot 10^{-001} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ . On remarque qu'elle se situe principalement au niveau des angles intérieurs de la culasse magnétique.

5. Densité des forces magnétiques

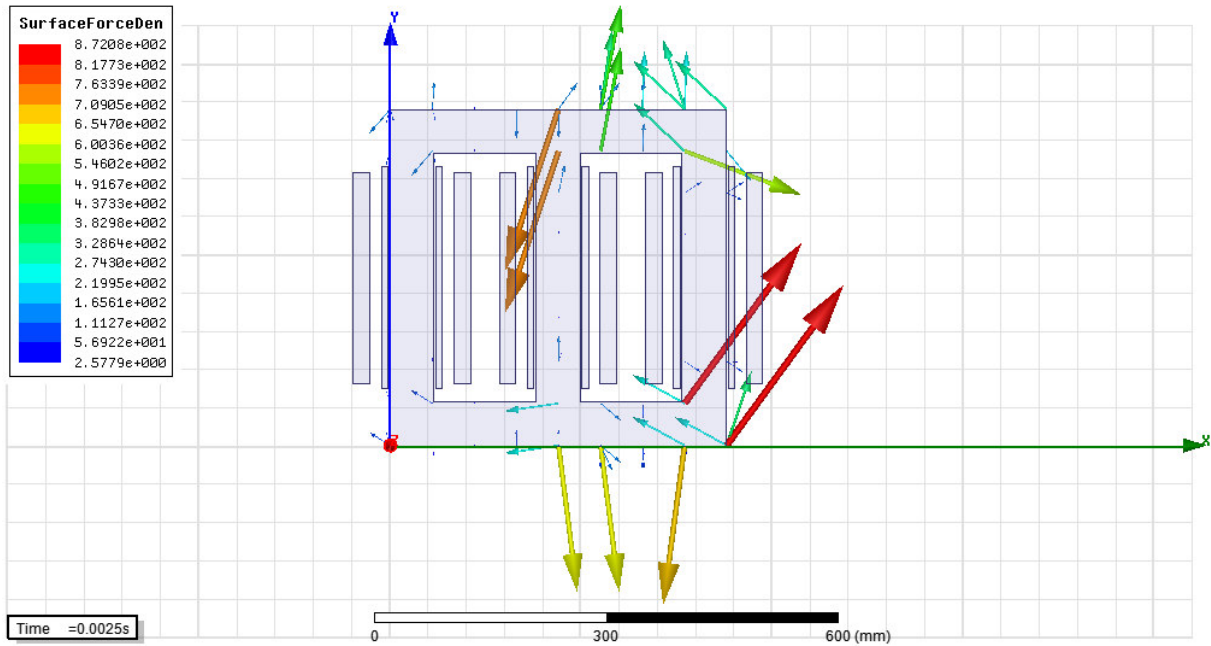


Figure IV.I.41 Densité des forces magnétiques à t = 0.0025s

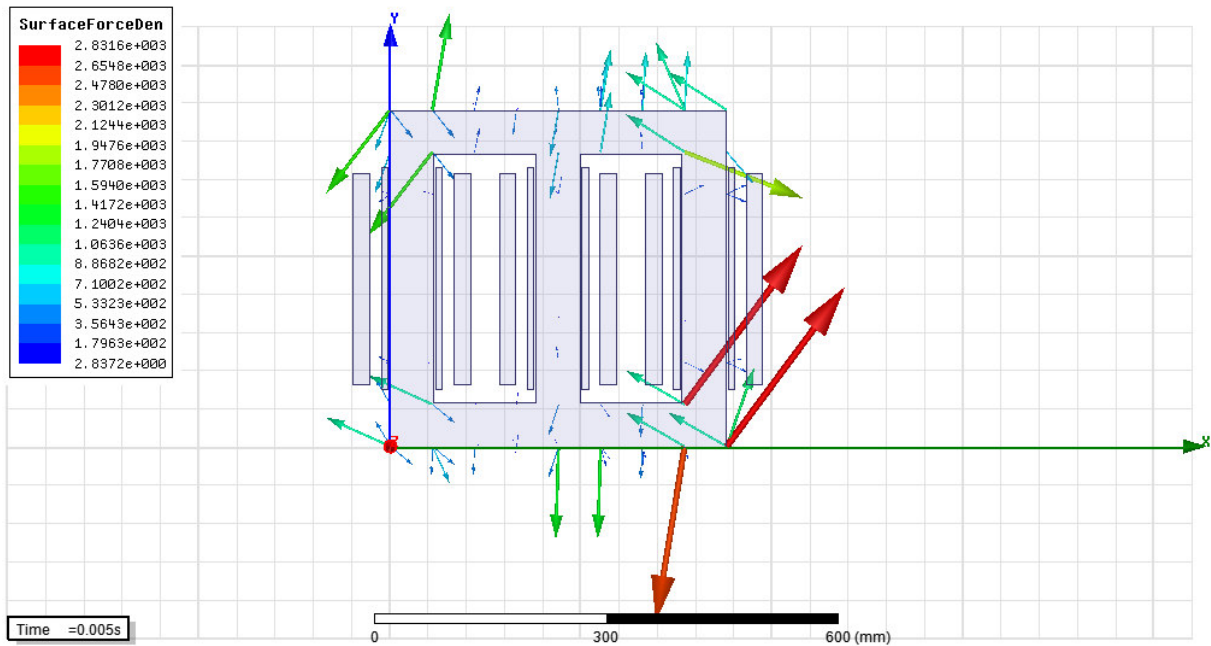


Figure IV.I.42 Densité des forces magnétiques à t = 0.005s

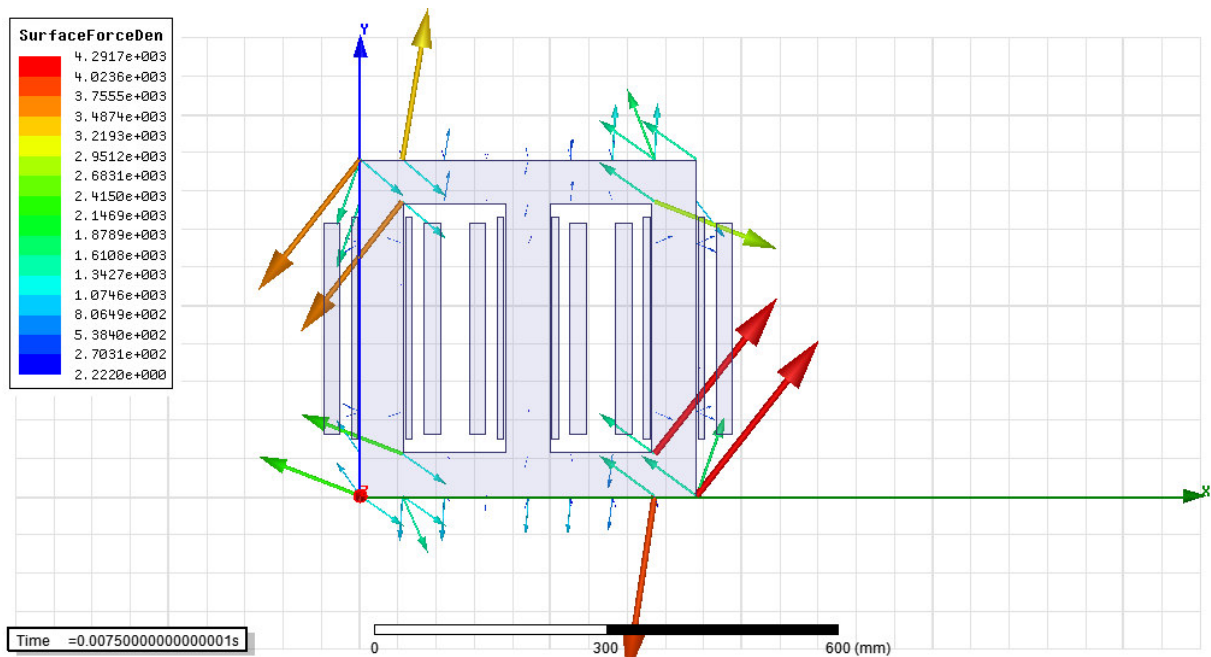


Figure IV.I.43 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.0075s$

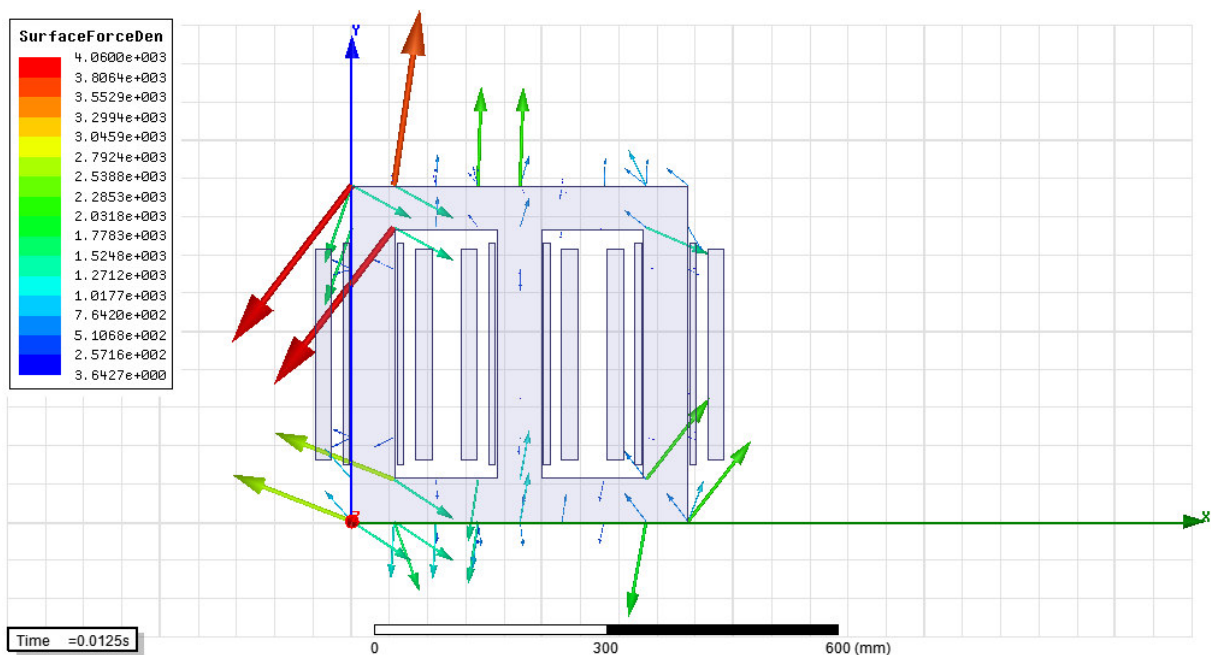


Figure IV.I.44 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les vecteurs de la densité des forces magnétiques se situent toujours dans les angles intérieurs de la culasse, avec une hausse des valeurs éminente atteignant un maximum à  $t = 0.0075s$  pour  $4.2917 \cdot 10^{+003} [N/m^2]$ .

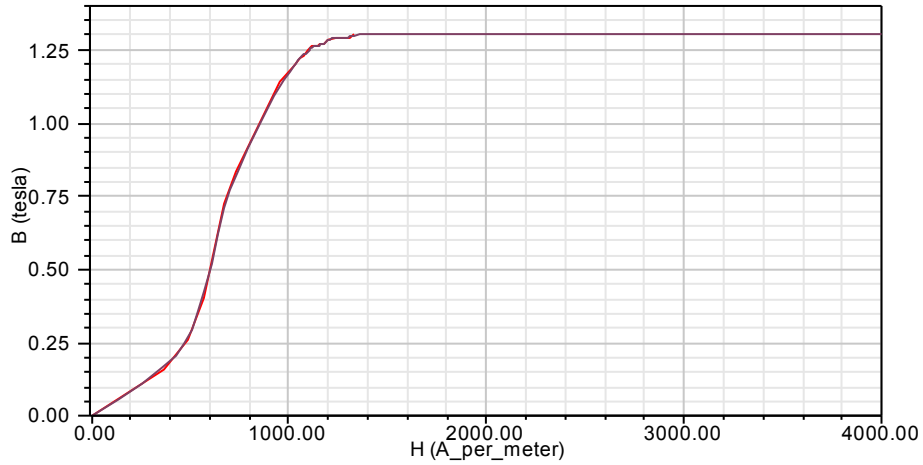


Figure IV.I.45 Courbe d'hysteresis du Fe\_Si pour la courbe de -39Mpa

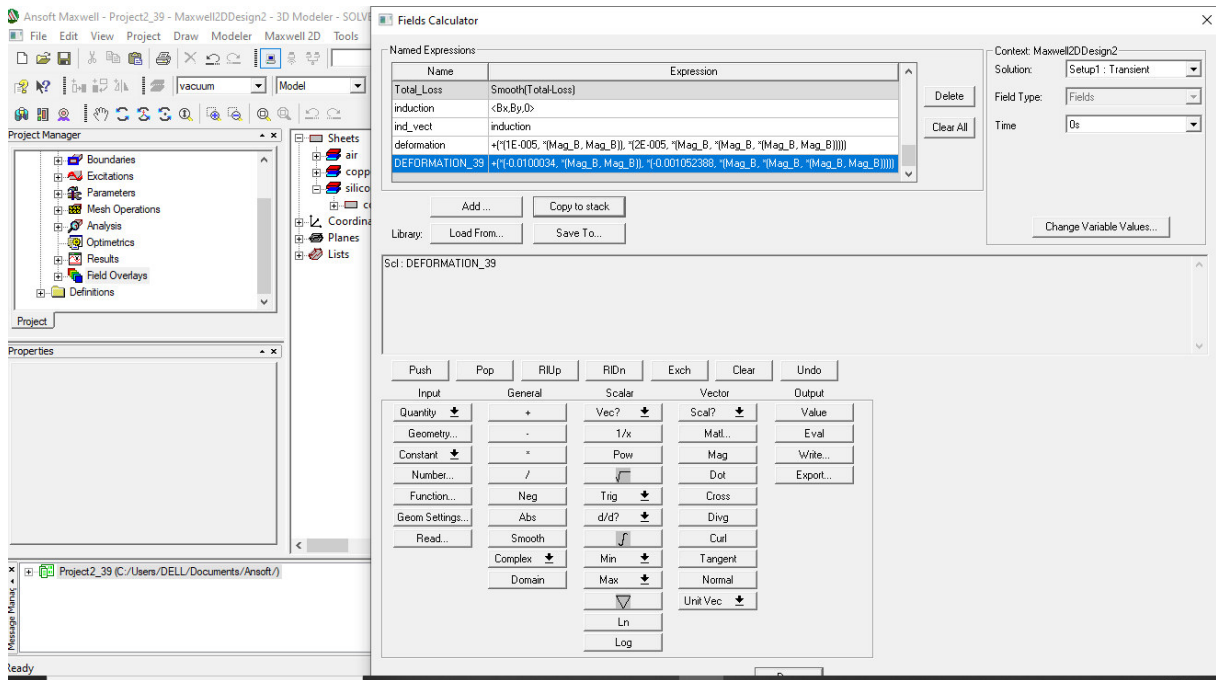


Figure IV.I.46 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -39 Mpa

1. Déformation de magnétostriction

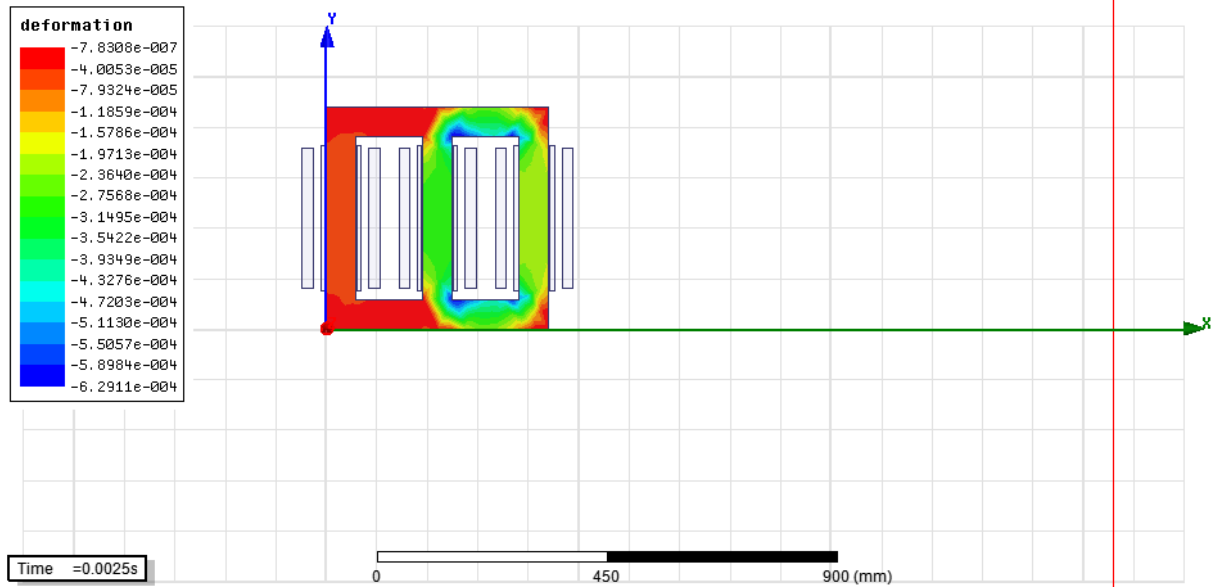


Figure IV.I.47 Déformation de magnétostriction à t = 0.0025s

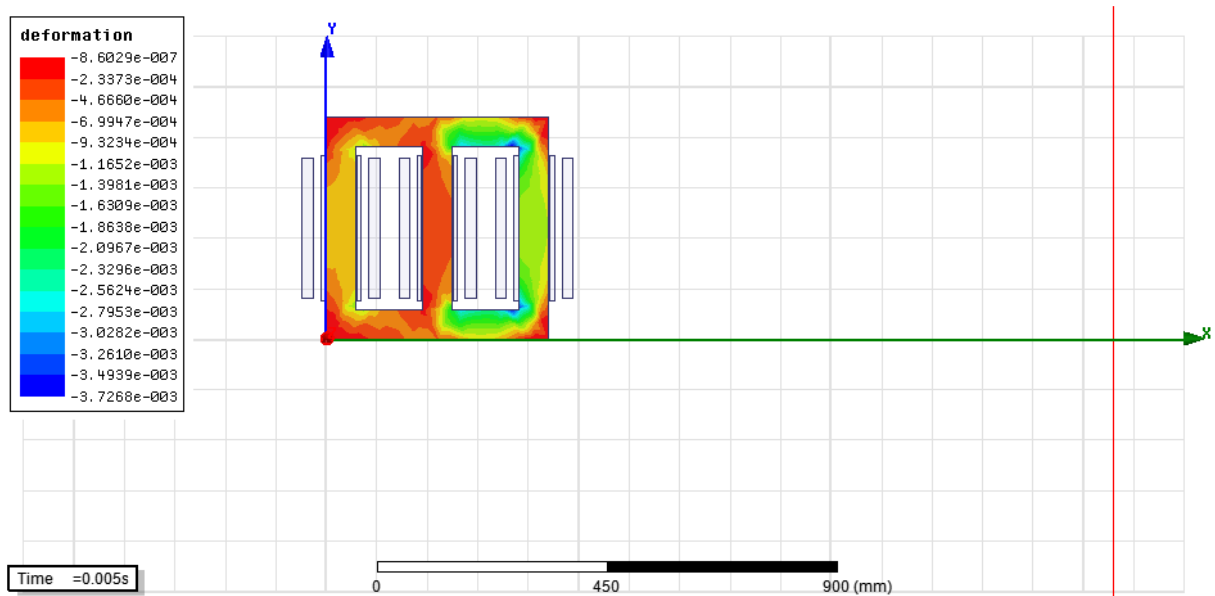


Figure IV.I.48 Déformation de magnétostriction à t = 0.005s

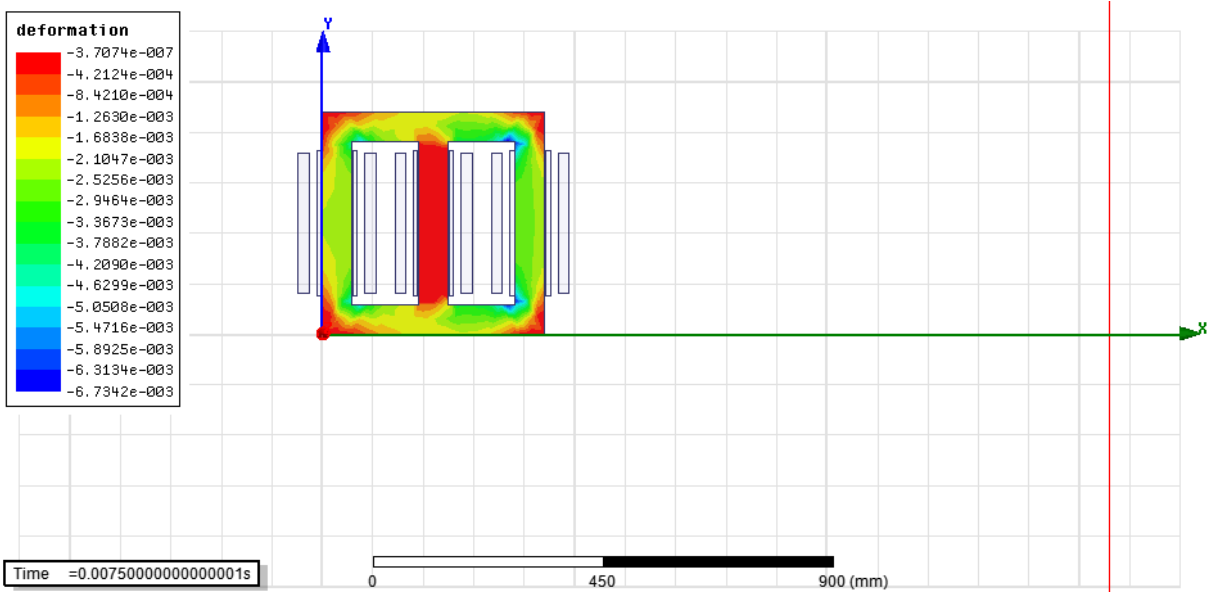


Figure IV.I.49 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$

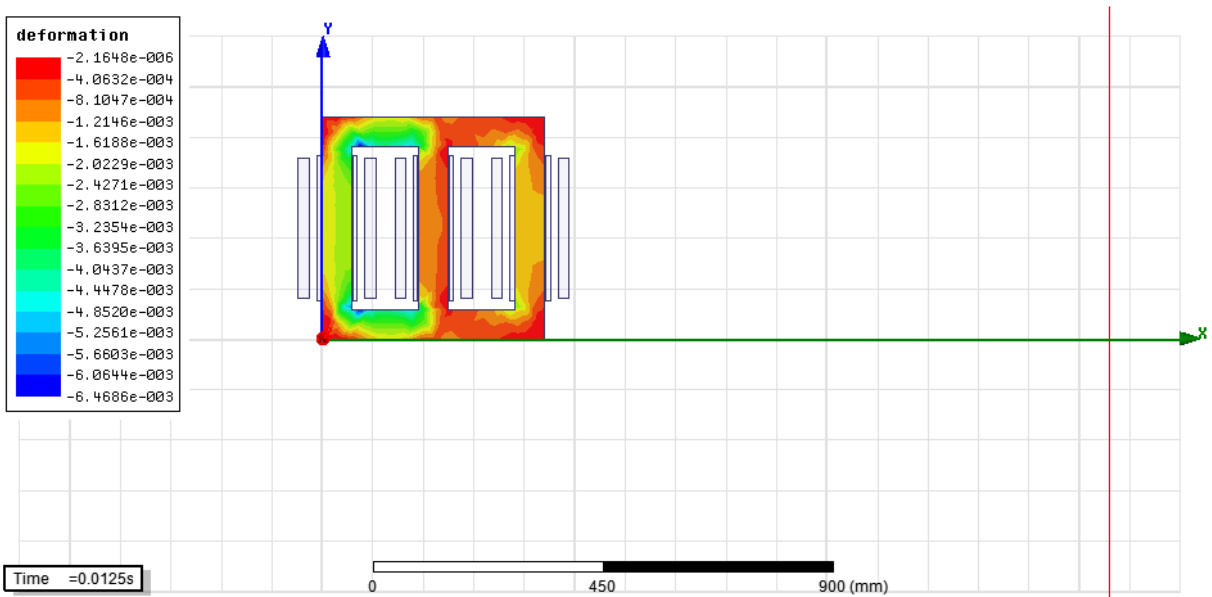


Figure IV.I.50 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125$

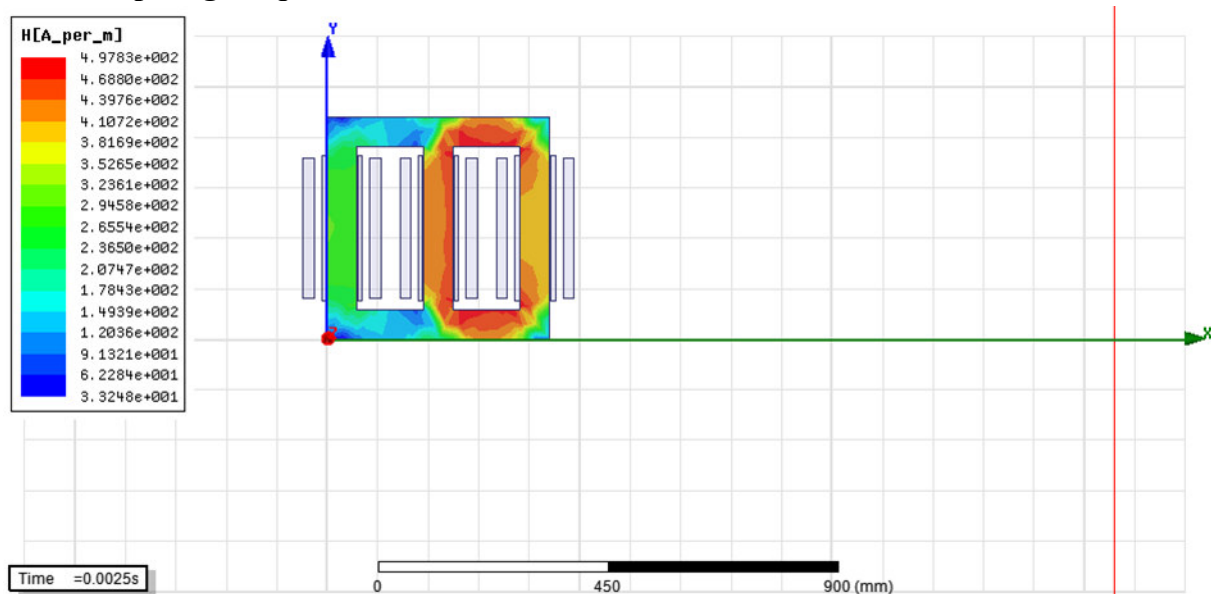
➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I.45) caractérise la courbe d’hystérésis du matériau fer silicium réalisée sous maxwell pour une contrainte de -39Mpa.

La formulation mathématique du problème est représentée dans la figure (IV.I.46).

Les figures (IV.I.47, IV.I.48, IV.I.49, et IV.I.50) représentent respectivement la répartition de la déformation dans le circuit magnétique, on constate qu’elle se situe toujours au niveau des angles supérieur et de la colonne centrale avec une augmentation de valeurs négatives à  $t=0.0075s$ .

**2. Champ magnétique H**



**Figure IV.I.51 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$**

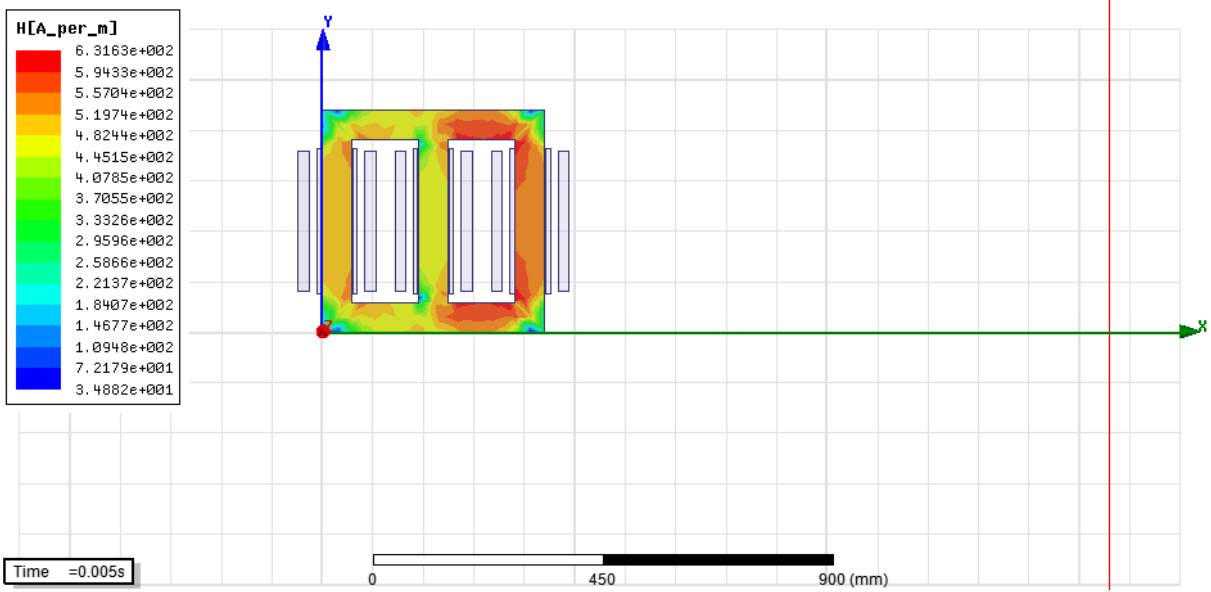


Figure IV.I.52 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$

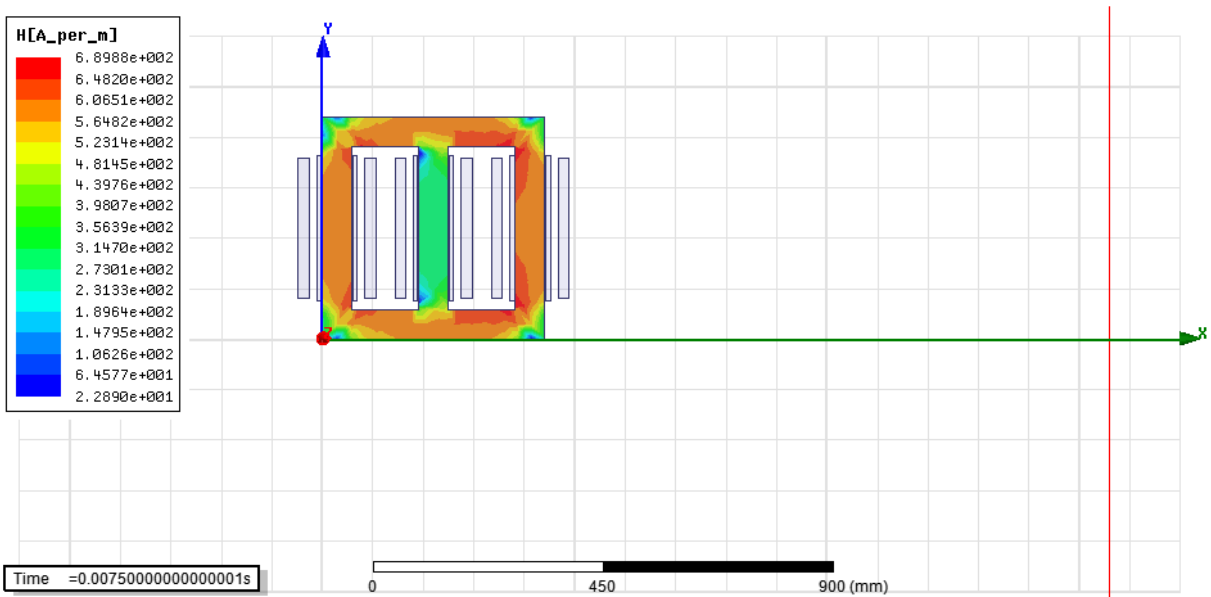


Figure IV.I.53 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0075s$

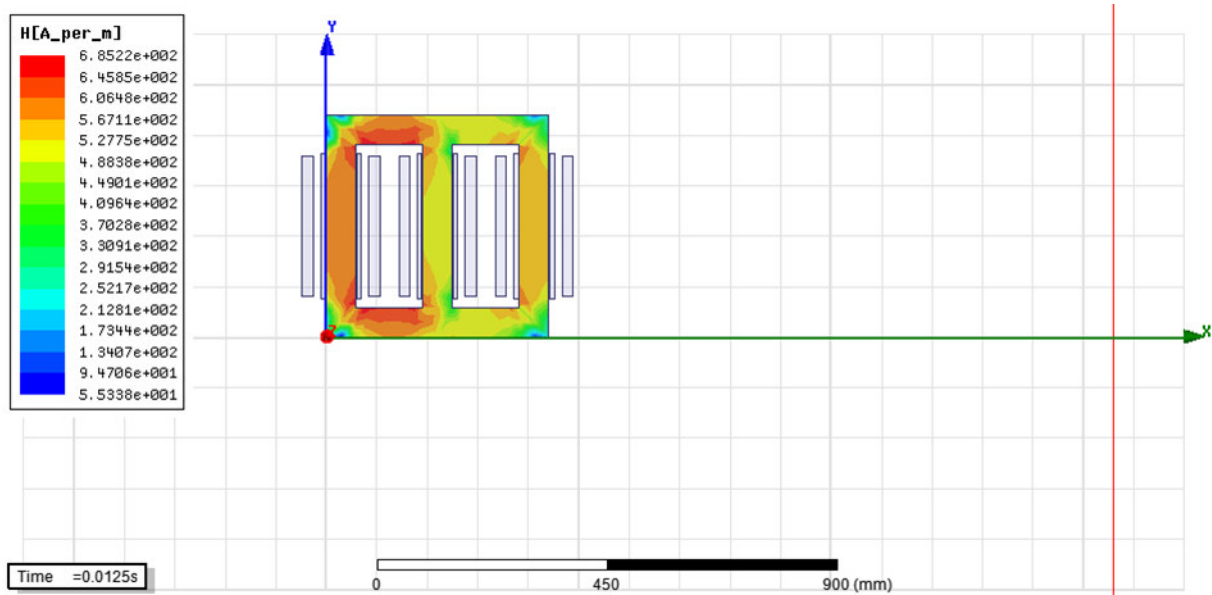


Figure IV.I.54 Distribution du champ magnétique  $H$  à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent un accroissement considérable de la répartition du champ magnétique au niveau de la culasse du transformateur, atteignant une valeur maximale de  $6.8988 \cdot 10^{+002}$  [A/m] à  $t = 0.0075s$ .

**3. Potentiel vecteur magnétique A**

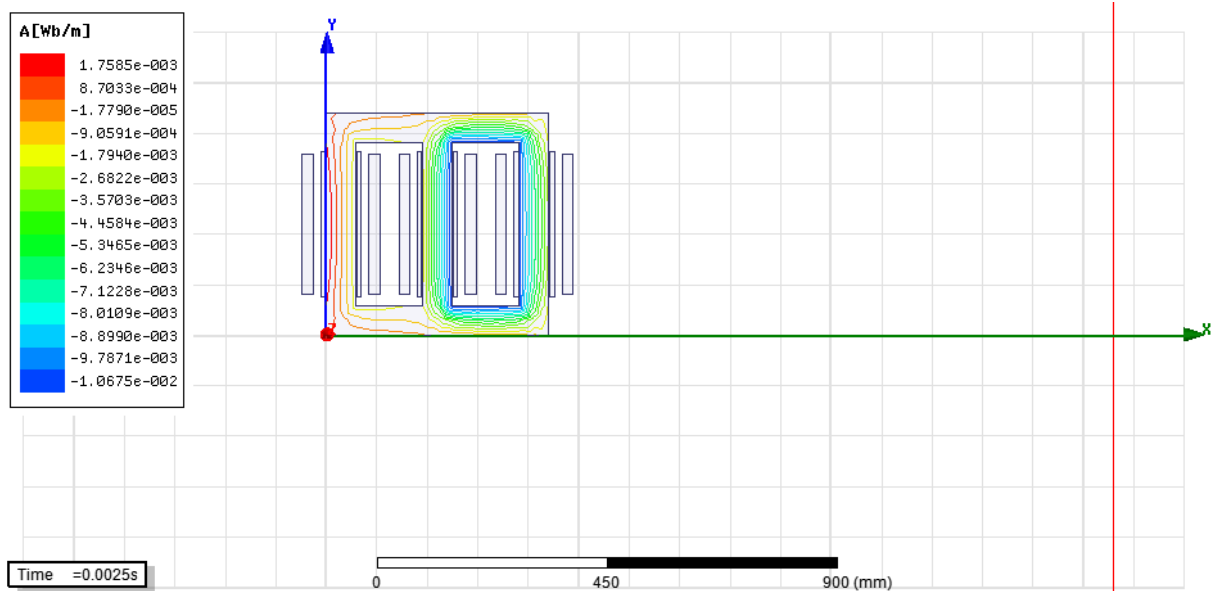


Figure IV.I.55 Potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.0025s$

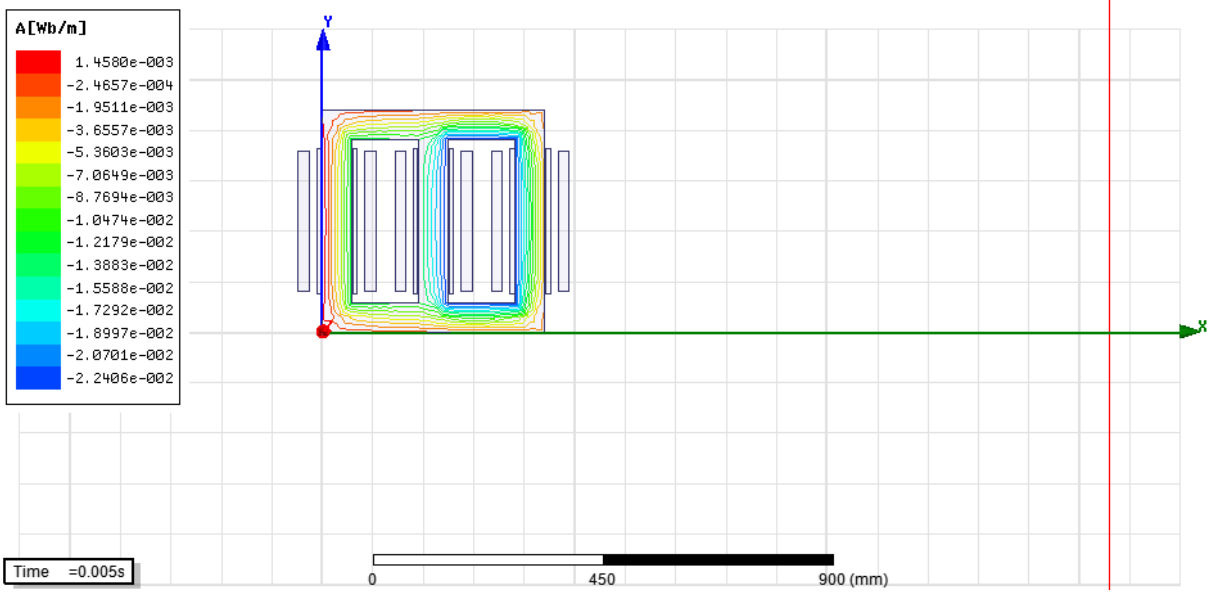


Figure IV.I.56 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$

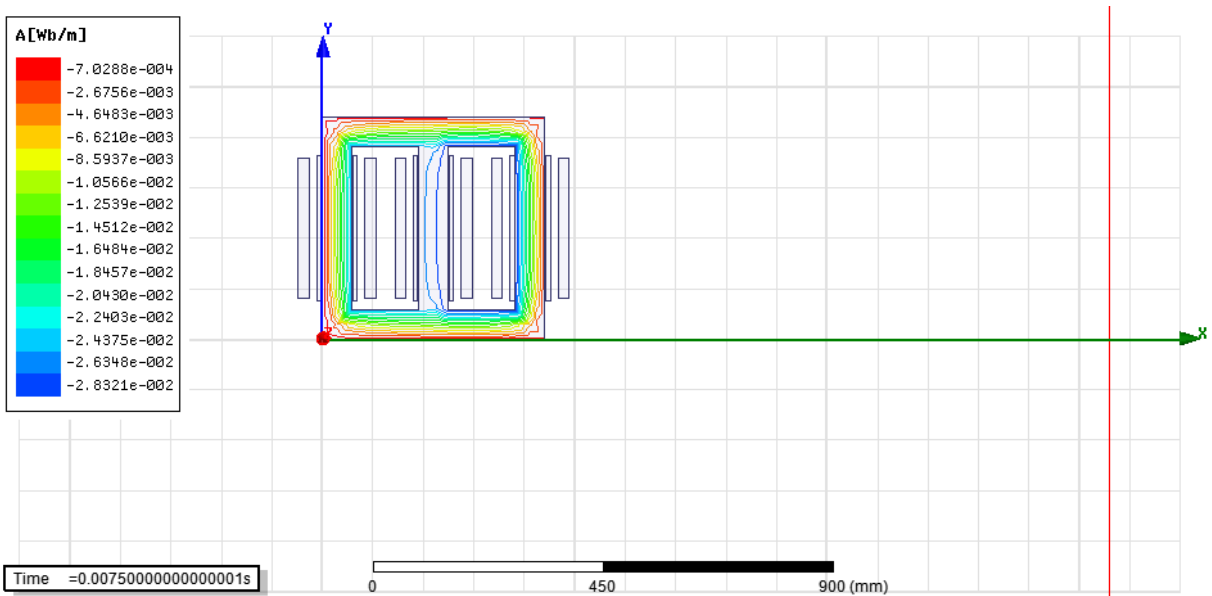


Figure IV.I.57 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0075s$

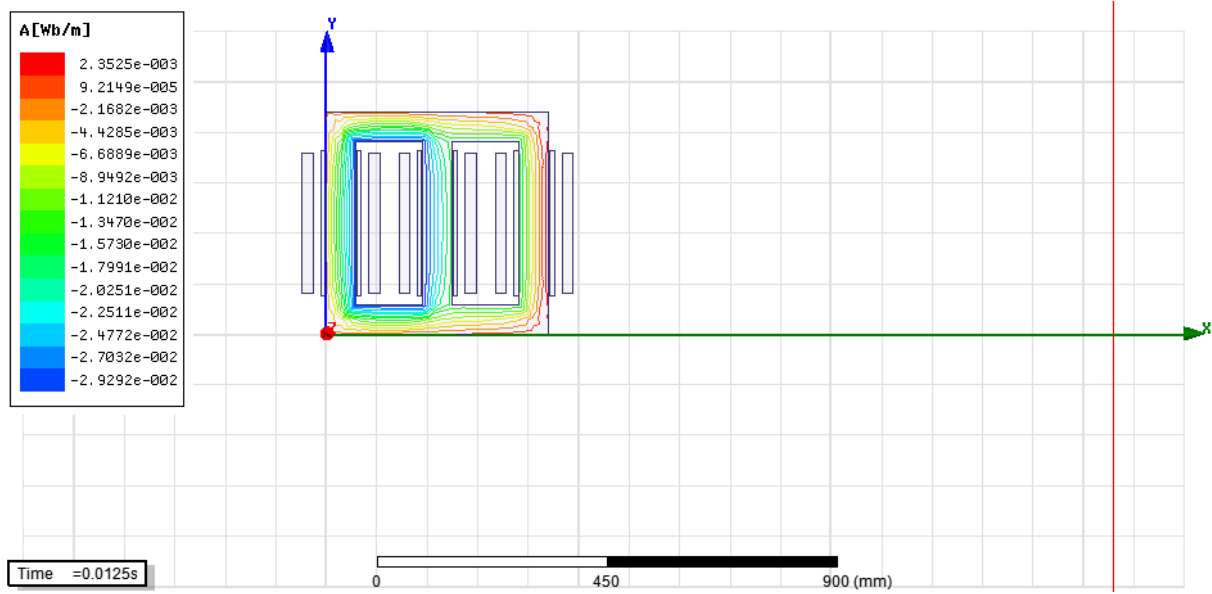


Figure IV.I.58 Potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t = 0.0125\text{s}$

#### 4. Induction magnétique B

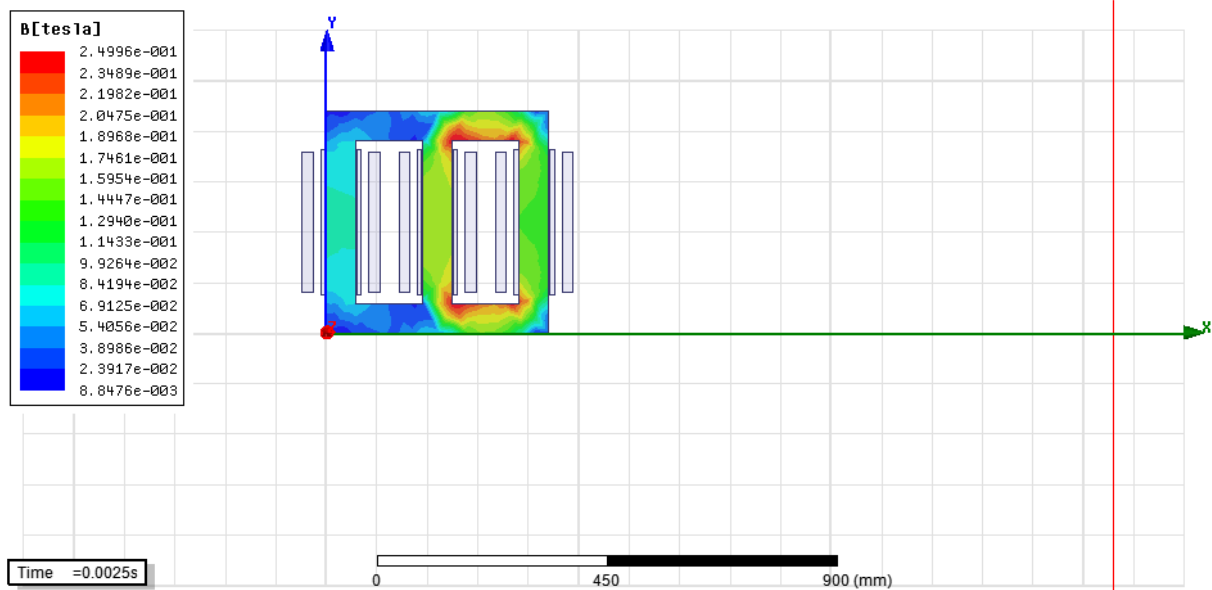


Figure IV.I.59 Induction magnétique  $B$  à  $t = 0.0025\text{s}$

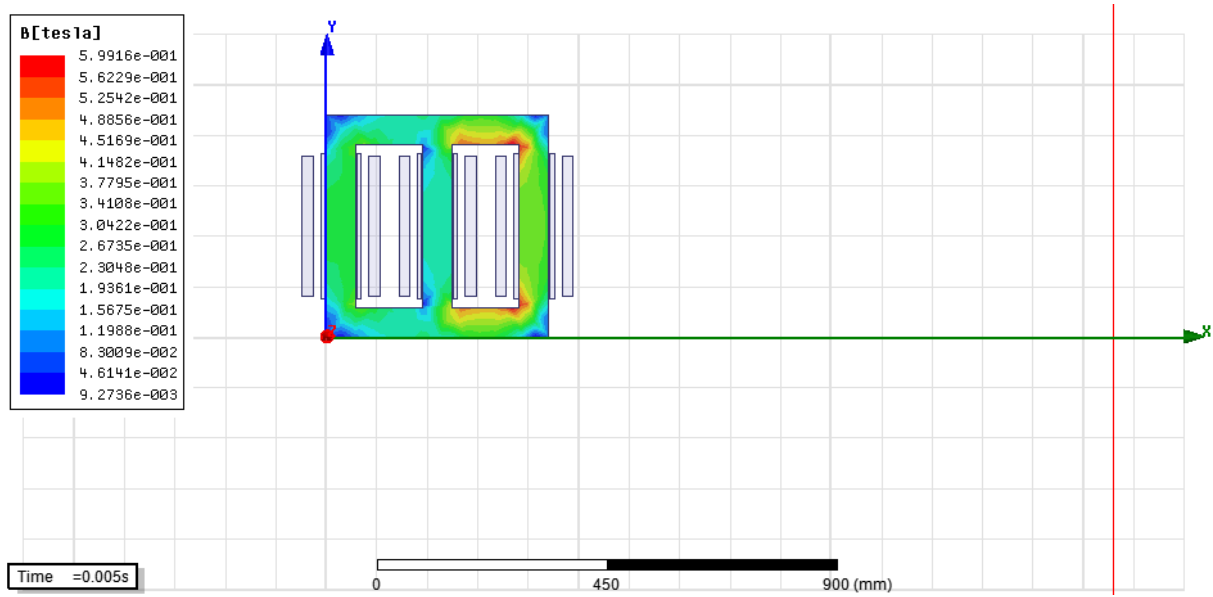


Figure IV.I.60 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$

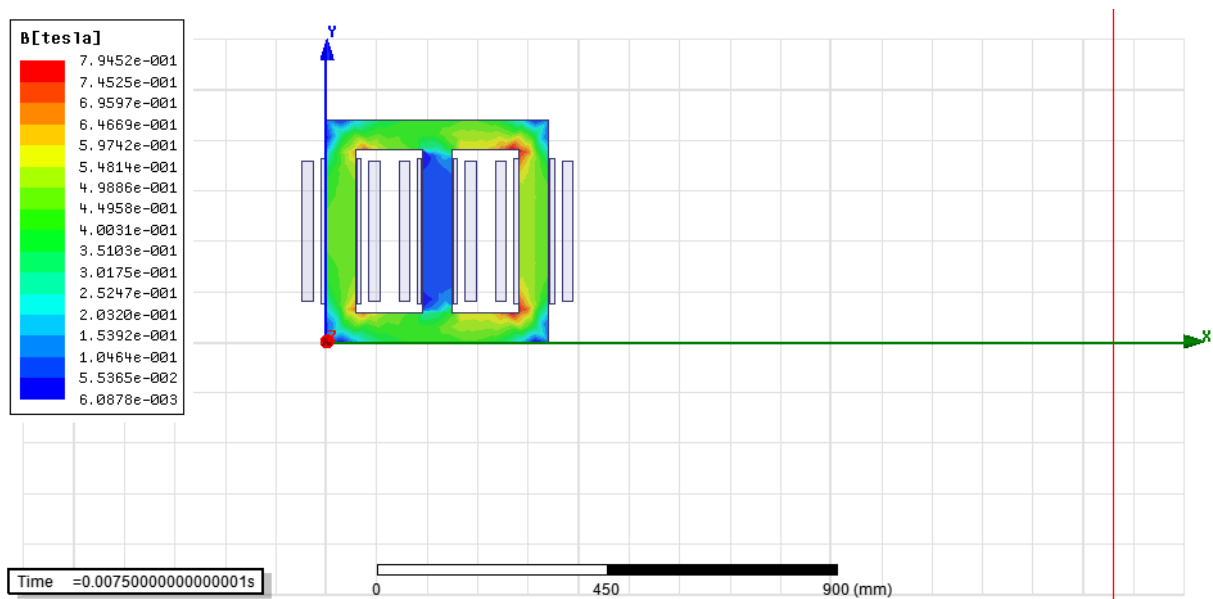


Figure IV.I.61 Induction magnétique B à  $t = 0.0075s$

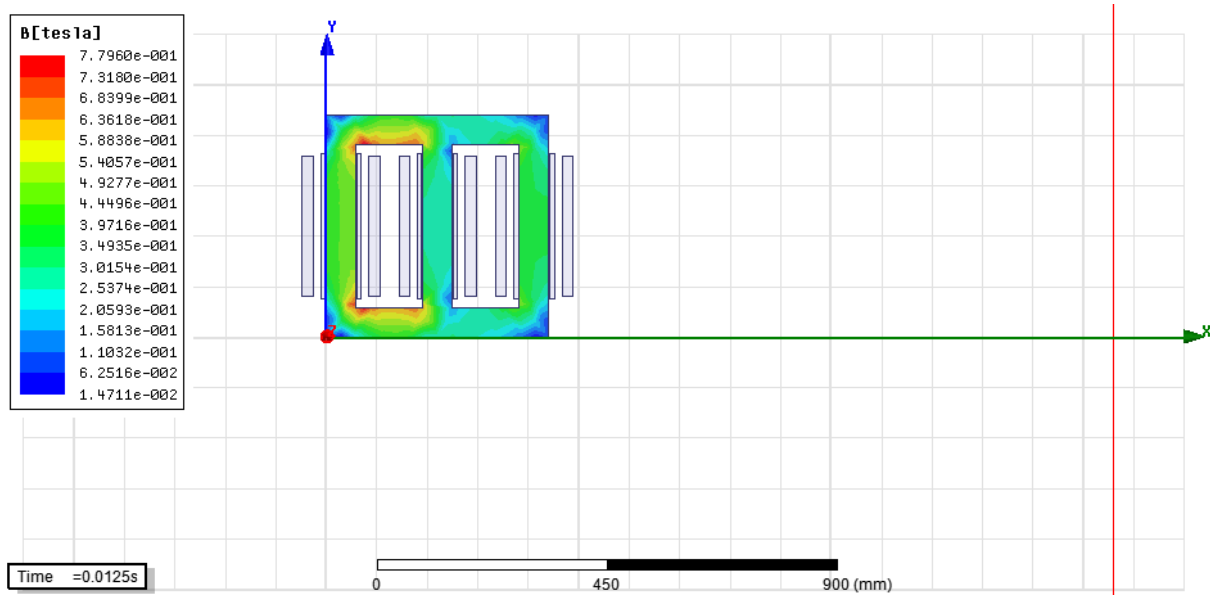


Figure IV.I.62 Induction magnétique B à t = 0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent une légère augmentation de la distribution de l'induction dans le circuit magnétique du transformateur, elle atteint une valeur maximale de l'ordre de  $7.9552 \cdot 10^{-001} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ .

**5. Densité des forces magnétiques**



Figure IV.I.63 Densité des forces magnétiques F à t=0.0025s

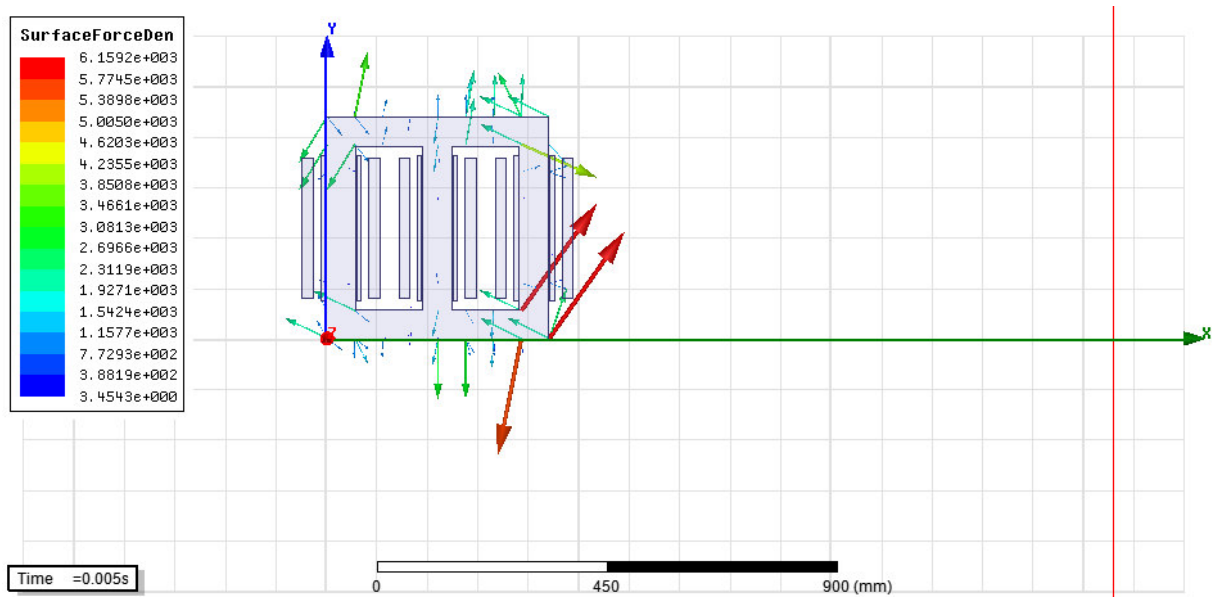


Figure IV.I.64 Densité des forces magnétiques F à t=0.005s

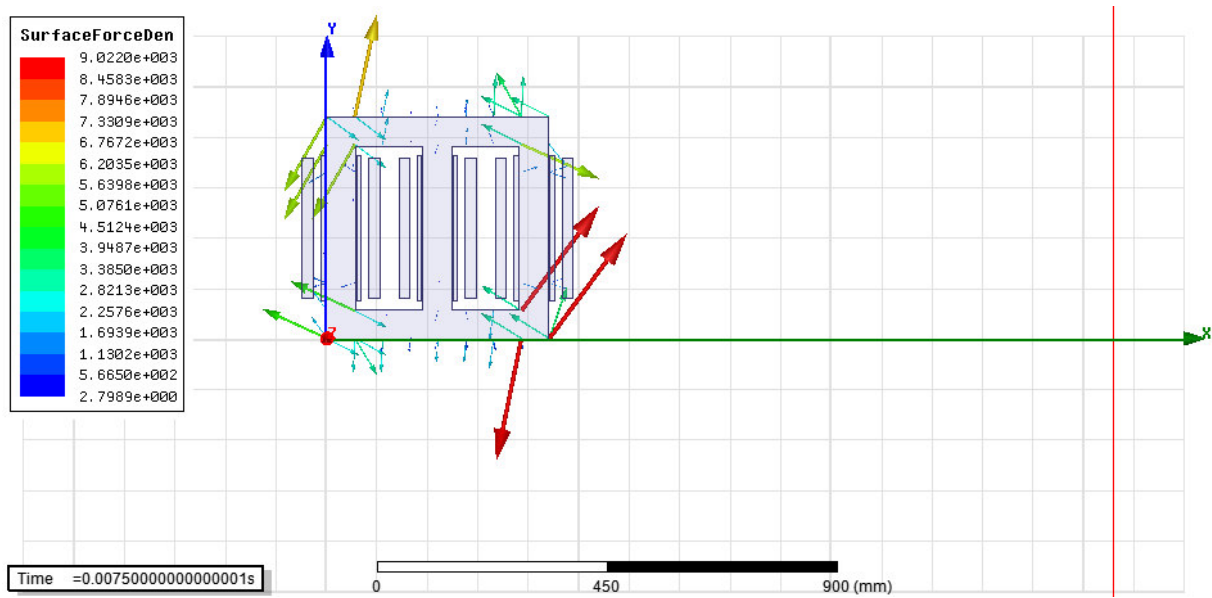


Figure IV.I.65 Densité des forces magnétiques F à t=0.0075s

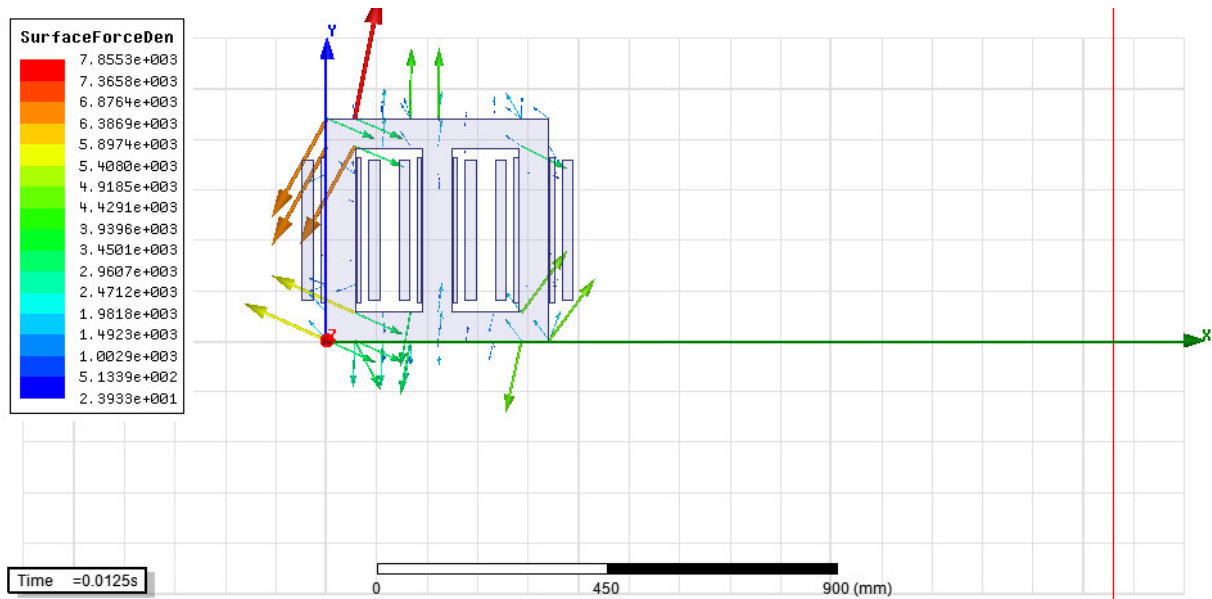


Figure IV.I.66 Densité des forces magnétiques F à t=0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

La répartition de la densité des forces magnétiques, a subit une croissance des valeurs distinguée atteignant un maximum à  $t = 0.0075s$  avec une valeur de  $9.0220 \cdot 10^{+003}$ .

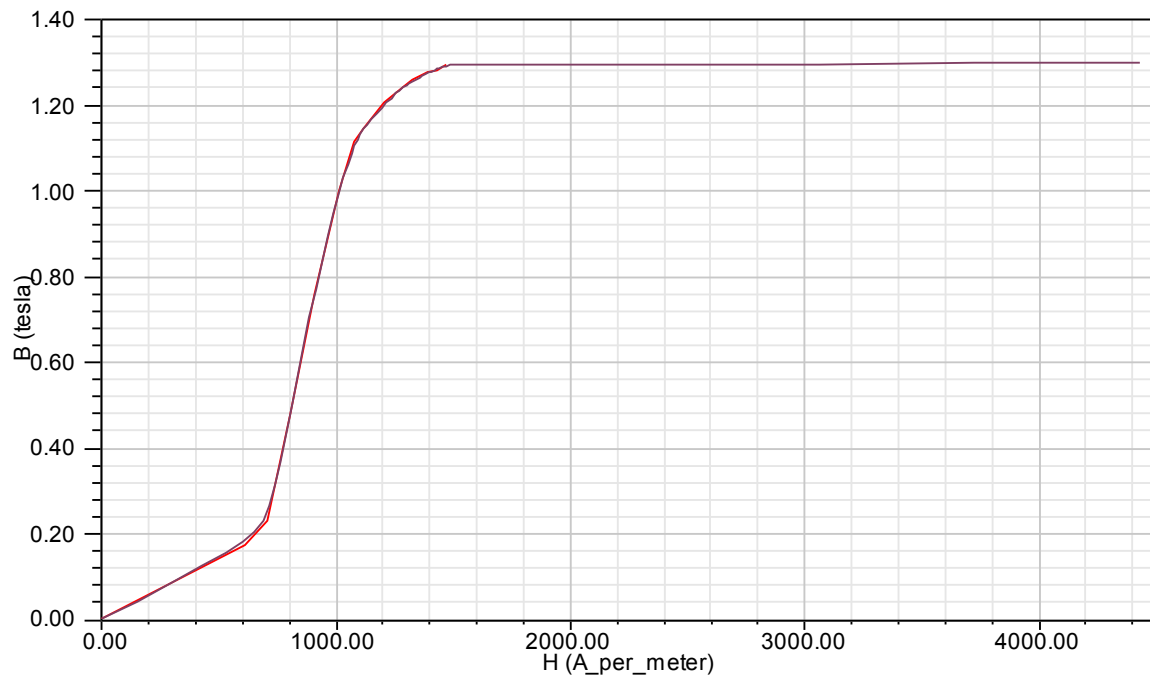


Figure IV.I.67 Courbe de Fe\_Si pour la contrainte -55Mpa

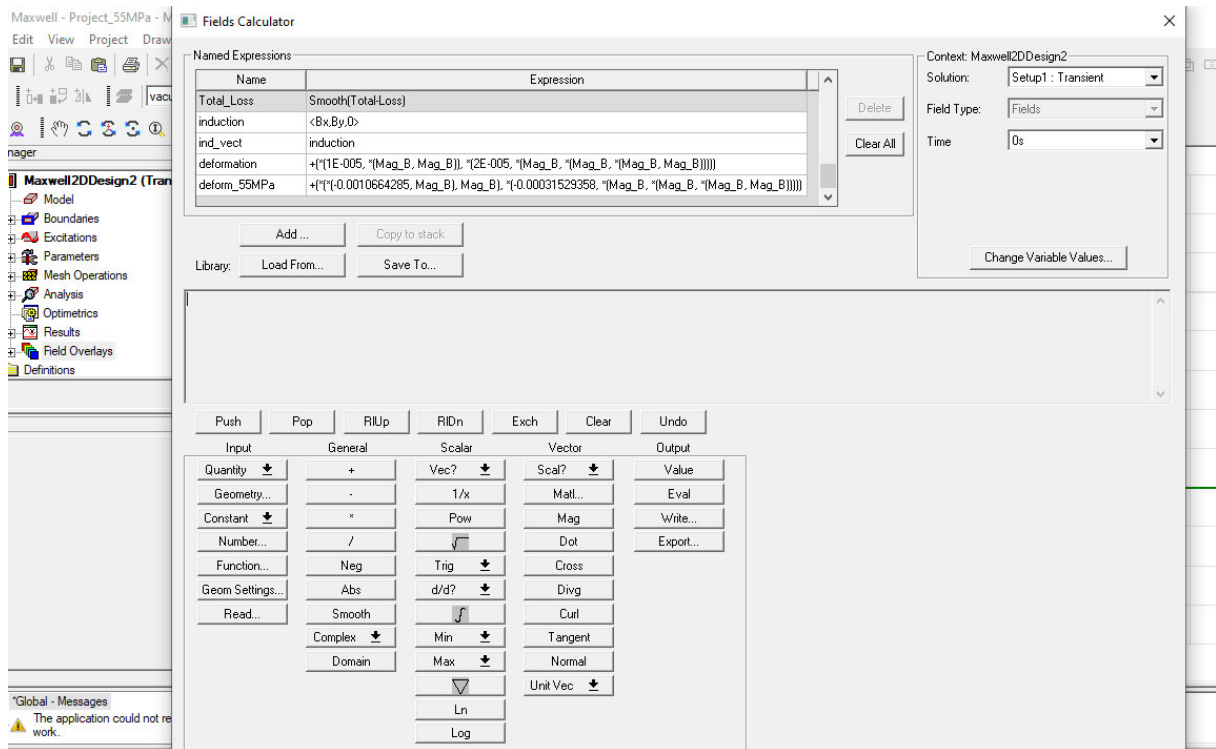


Figure IV.I.68 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -55 Mpa

1. Déformation de magnétostriction

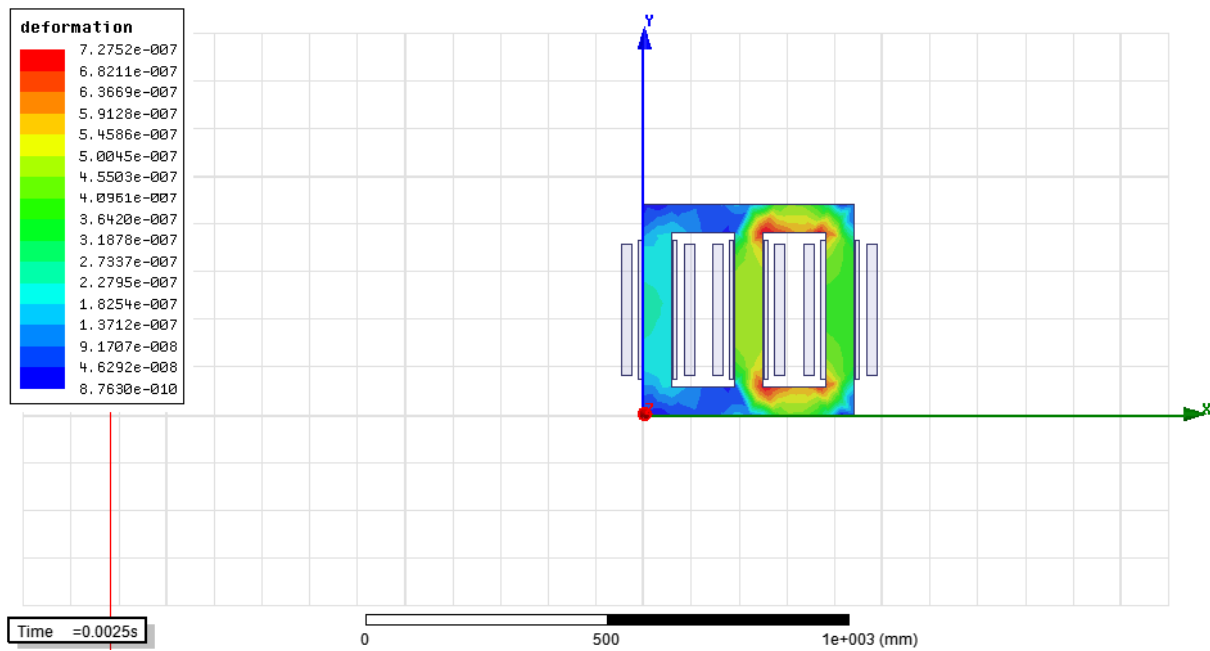


Figure IV.I.69 Déformation de magnétostriction à t = 0.0025s

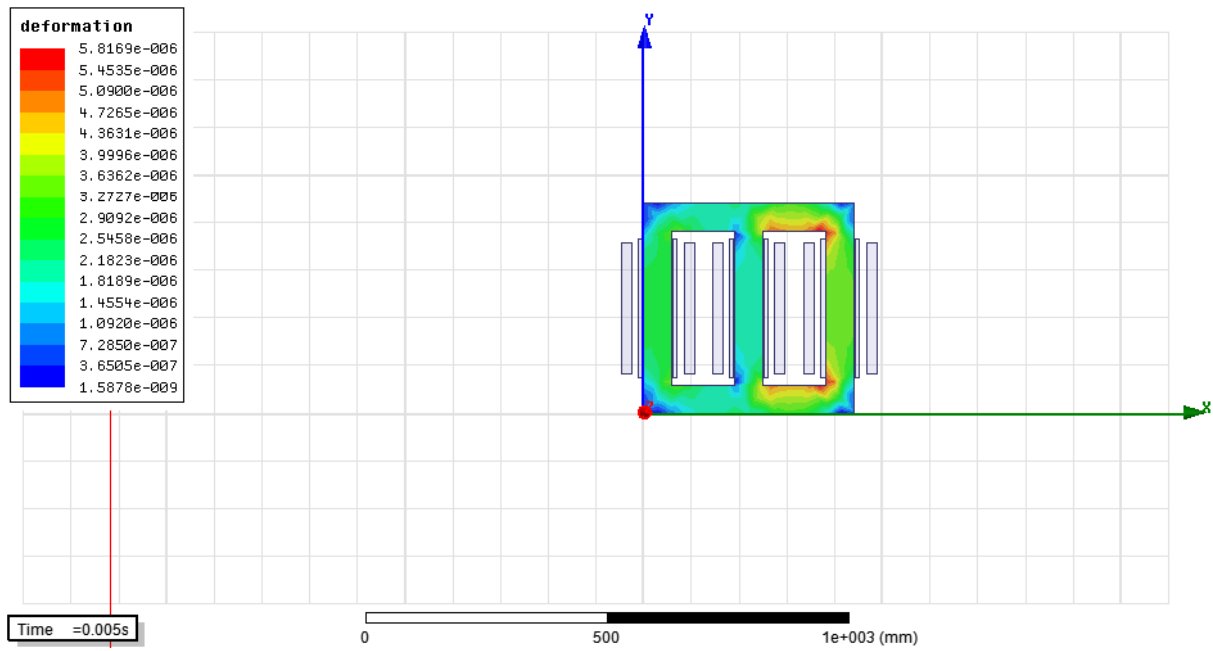


Figure IV.I.70 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$

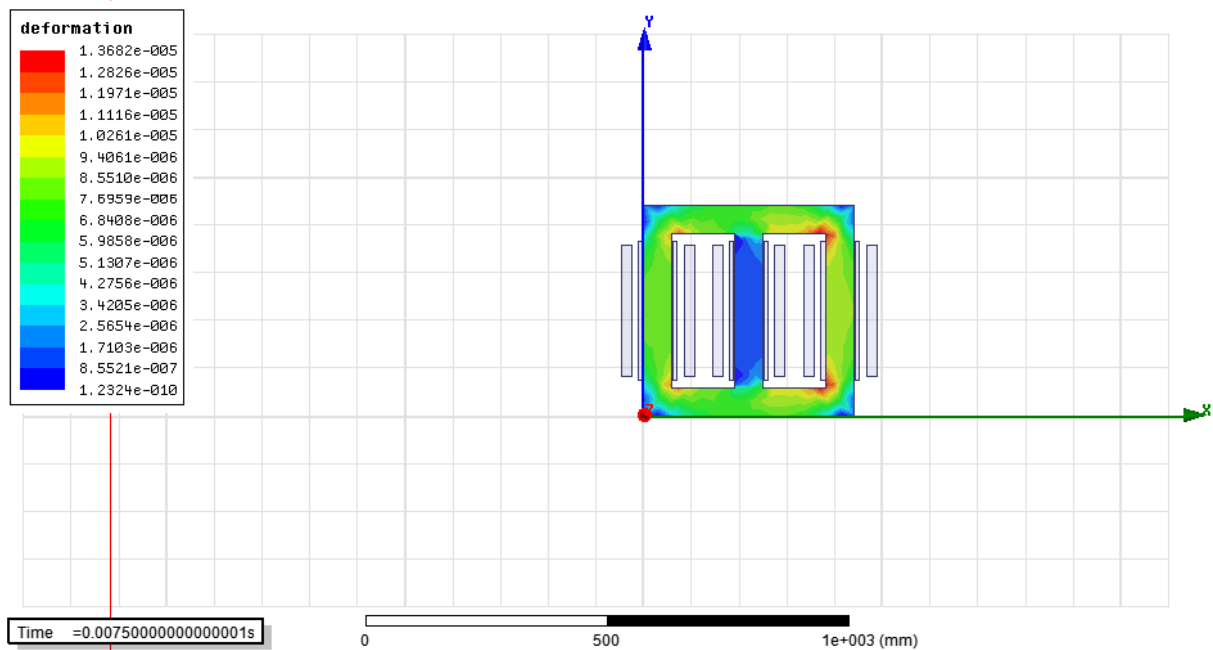


Figure IV.I.71 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$

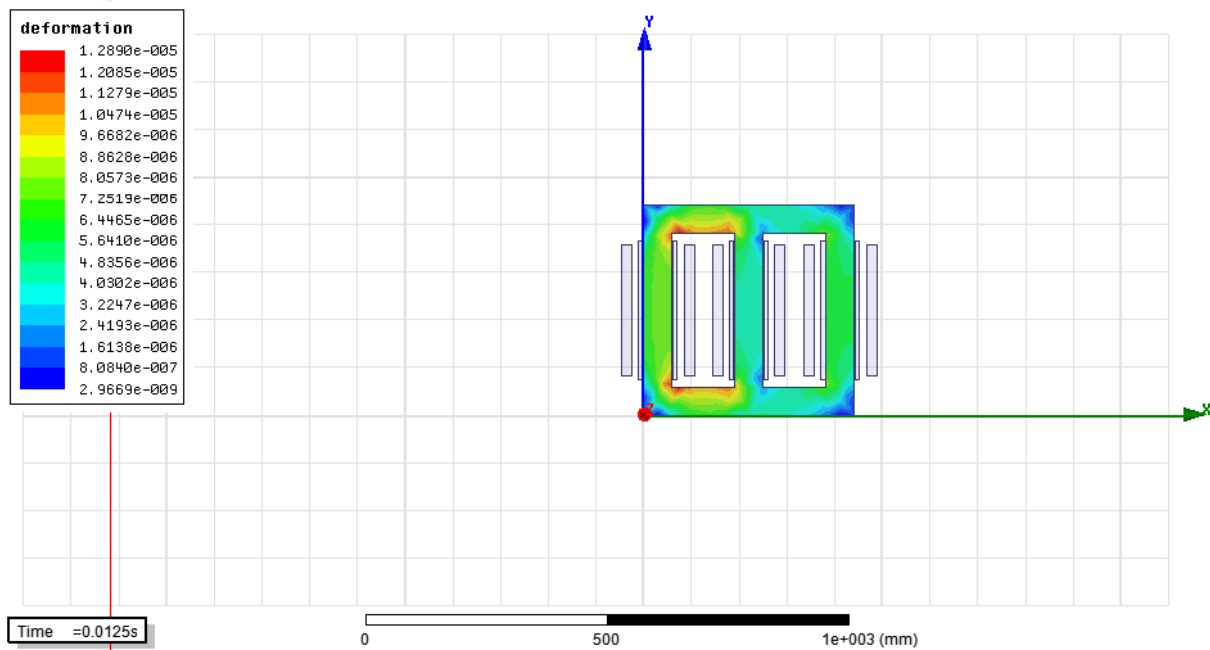


Figure IV.I.72 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I.67) caractérise la courbe d'hystérésis du matériau fer silicium réalisée sous maxwell pour une contrainte de -55Mpa.

La formulation mathématique du problème est représentée dans la figure (IV.I. 68).

Les figures (IV.I.69, IV.I.70, IV.I.71 et IV.I.72) représentent respectivement la répartition de la déformation dans le circuit magnétique du transformateur.

On remarque que la déformation s'est rapproché des angles intérieurs de la culasse magnétique avec des valeurs maximales positives à  $t=0.0075s$ .

2. Champ magnétique H

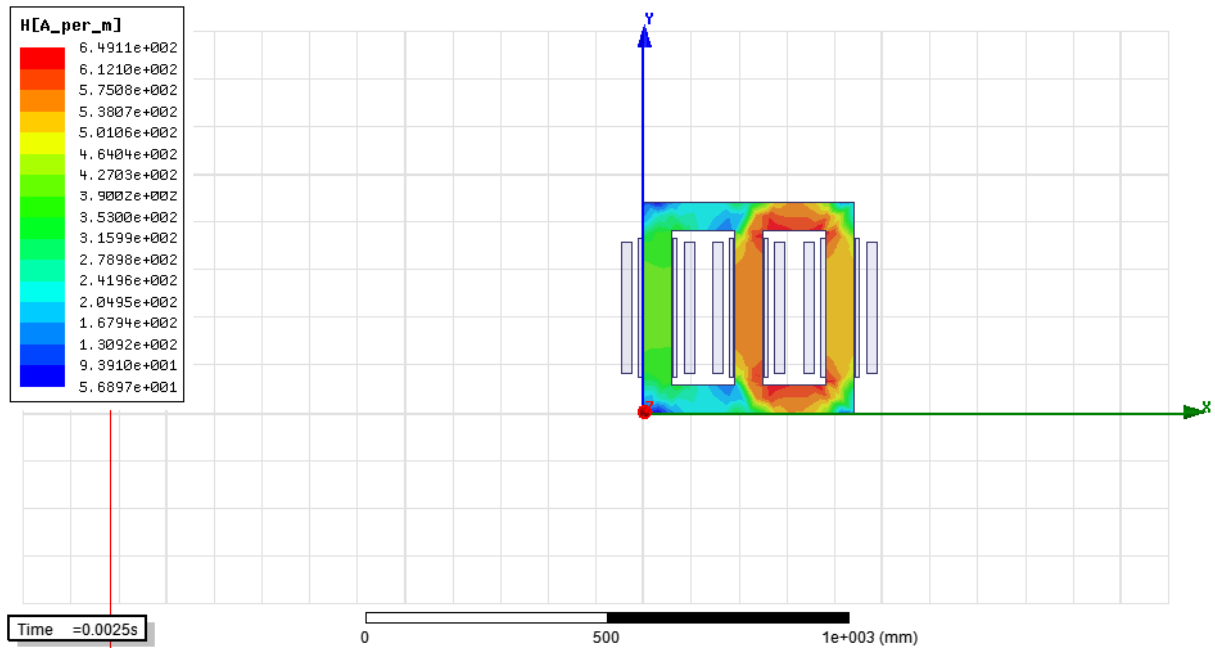


Figure IV.I.73 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0025s$

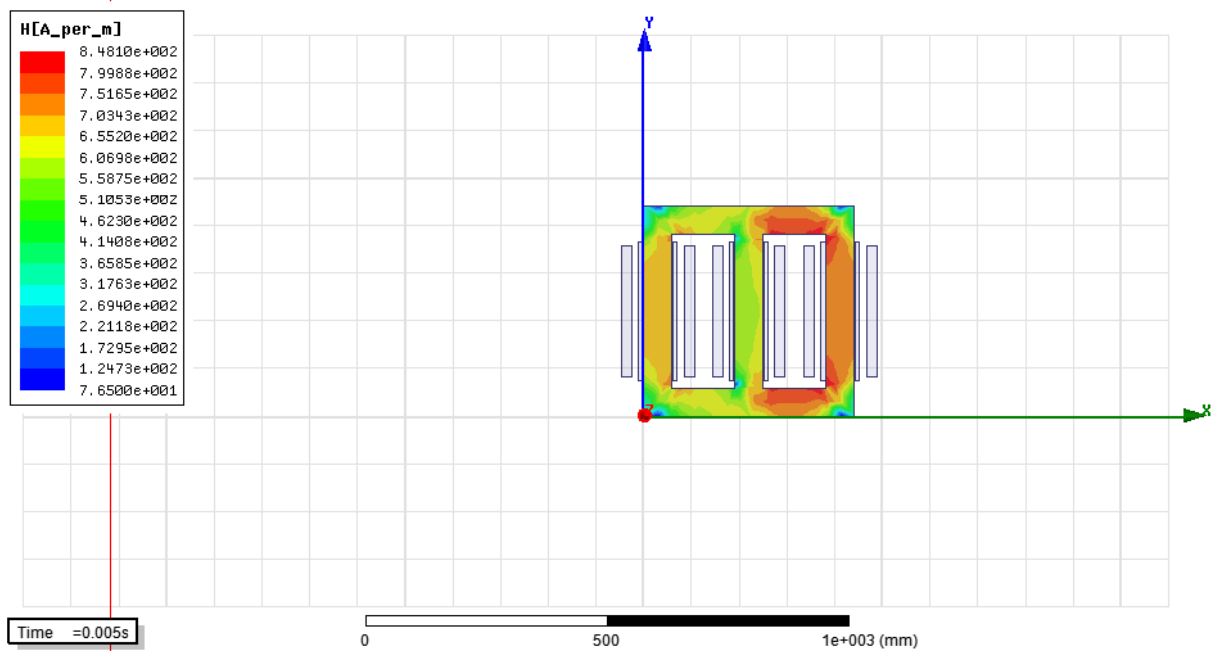


Figure IV.I.74 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.005s$

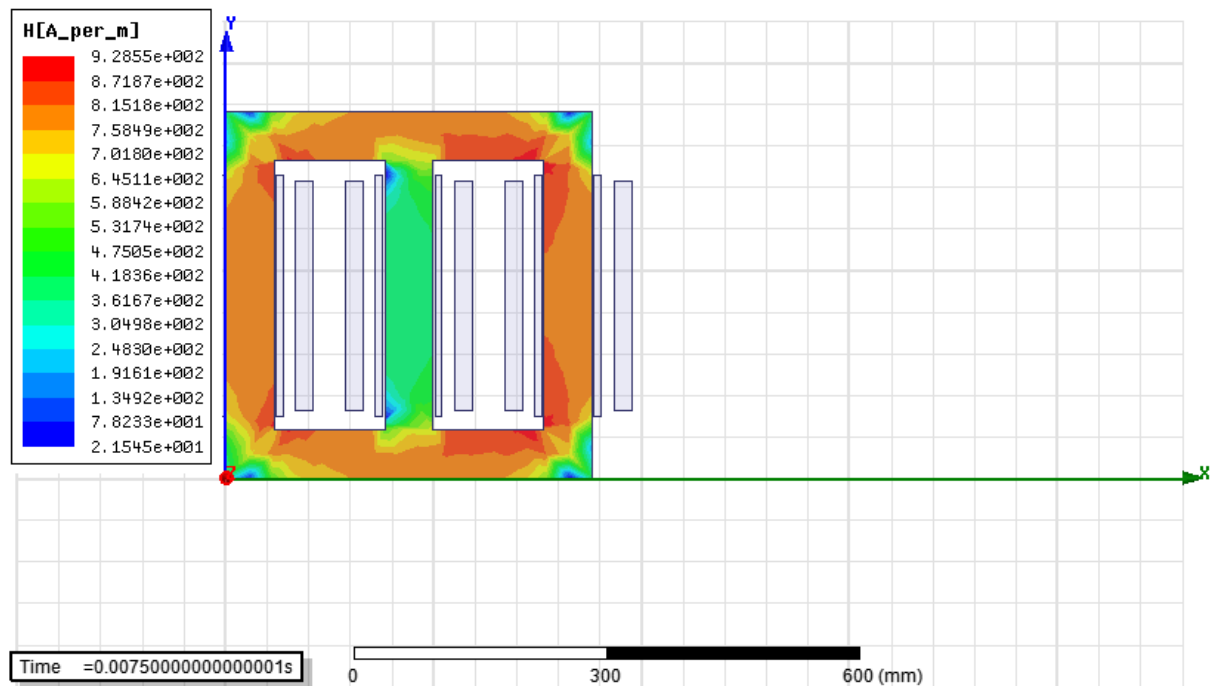


Figure IV.I.75 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0075s$

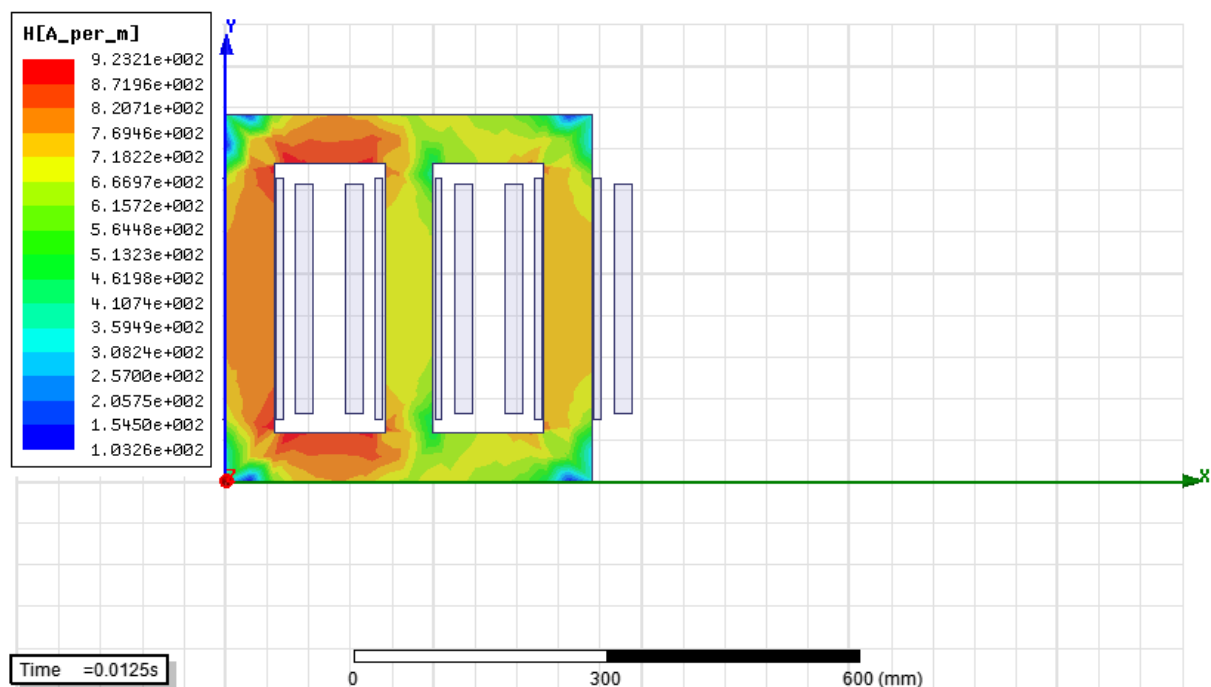


Figure IV.I.76 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent un accroissement considérable de la répartition du champ magnétique au niveau de la culasse du transformateur gardant la même location de propagation, atteignant une valeur maximale de  $9.2855 \cdot 10^{+002} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ .

3. Induction magnétique B

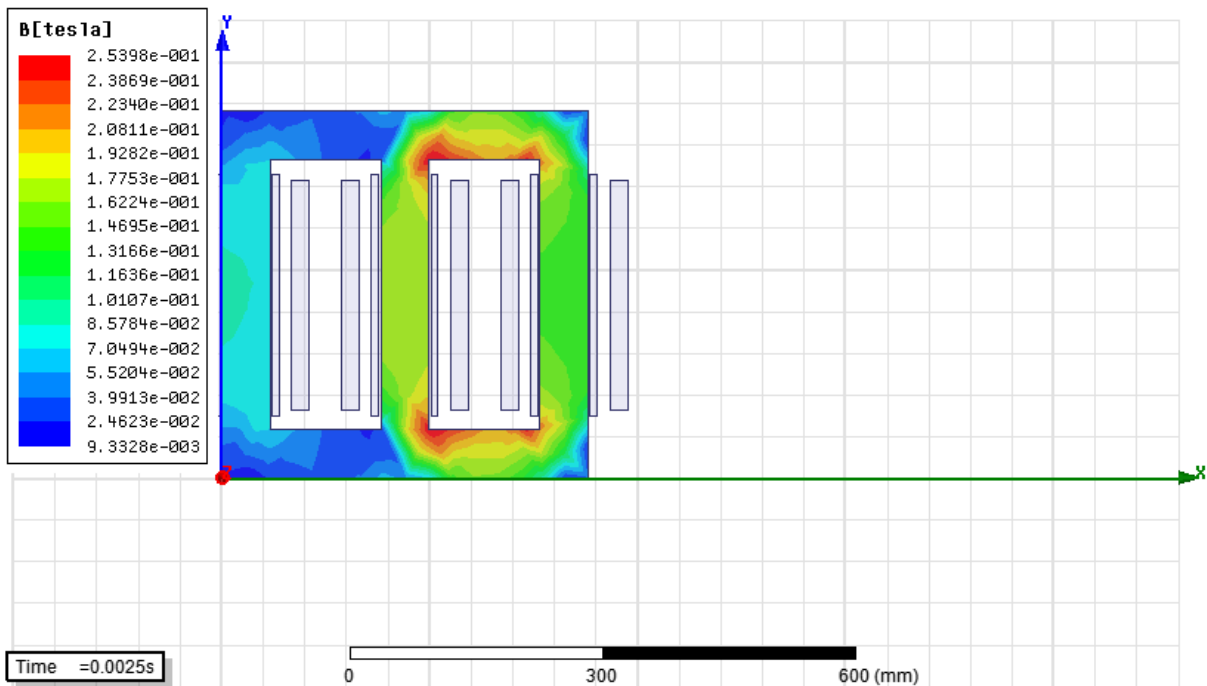


Figure IV.I.77 Induction magnétique B à l'instant  $t=0.0025s$

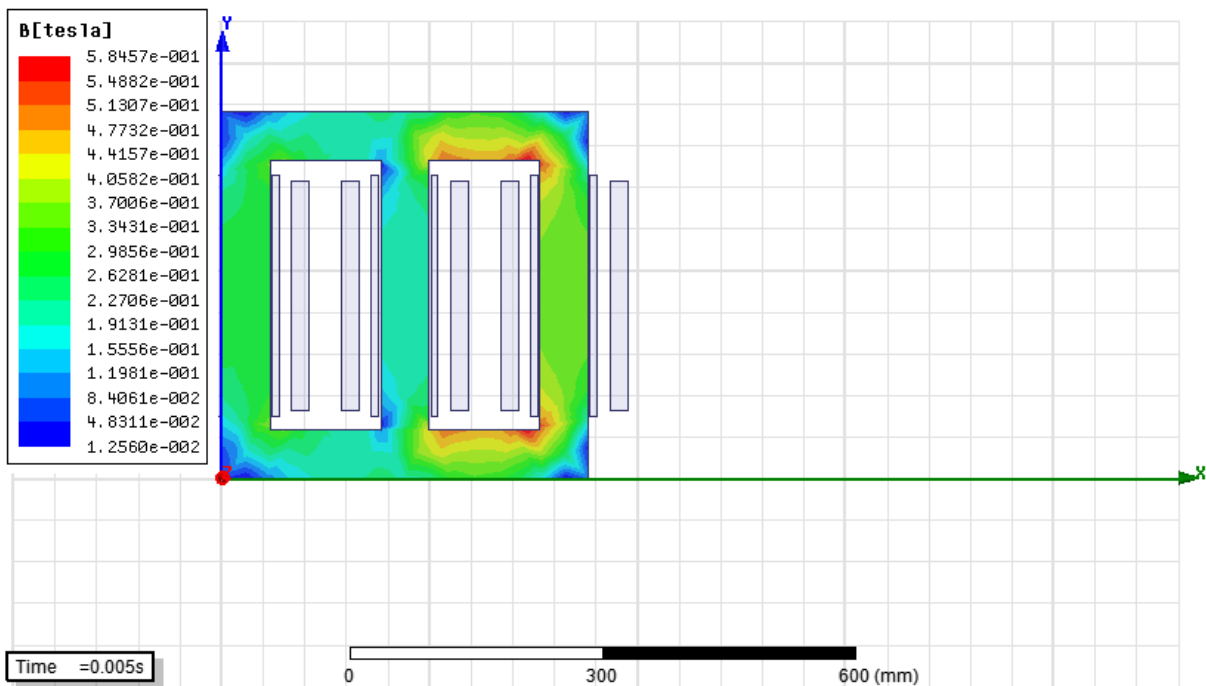


Figure IV.I.78 Induction magnétique B à l'instant  $t = 0.005s$

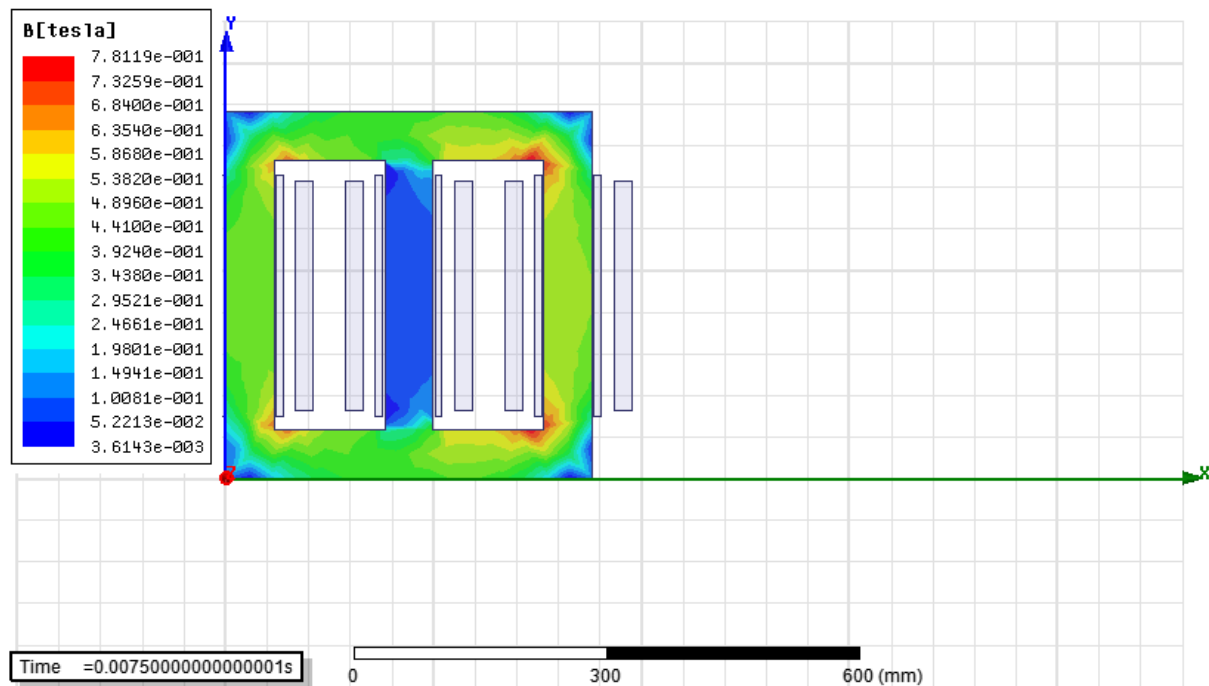


Figure IV.I.79 Induction magnétique  $B$  à l'instant  $t = 0.0075s$

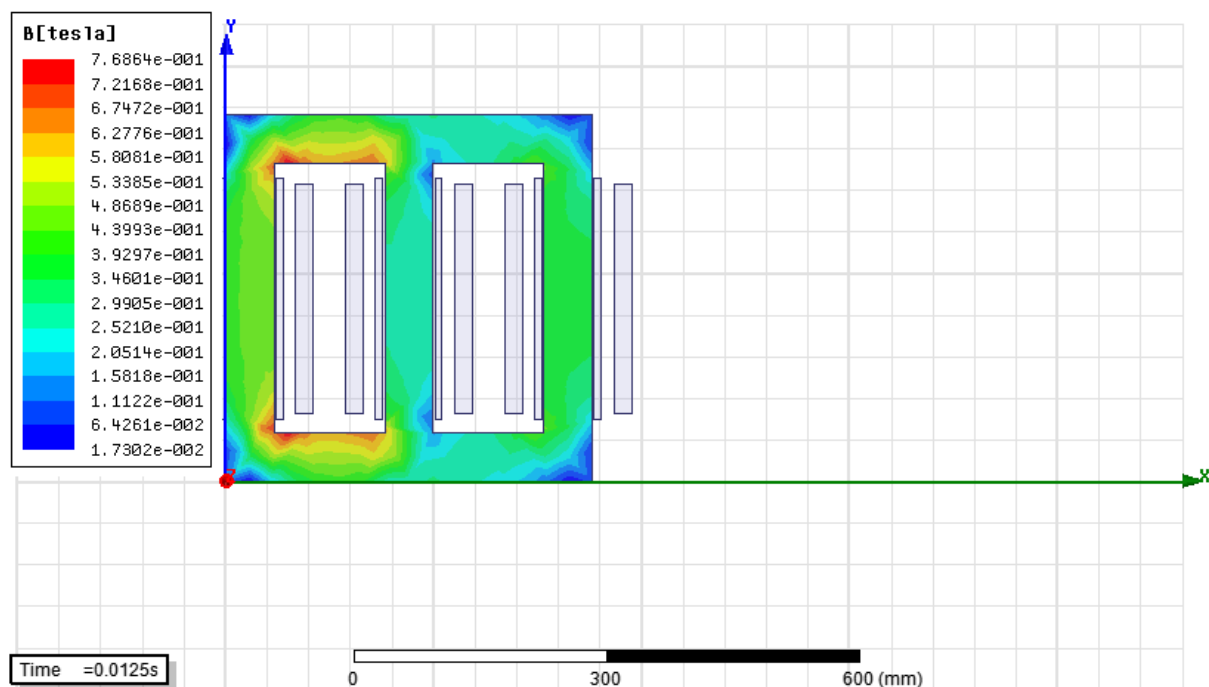


Figure IV.I.80 Induction magnétique  $B$  à l'instant  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I.79) montre une légère augmentation de la distribution de l'induction dans le circuit magnétique du transformateur, elle atteint une valeur maximale de l'ordre de  $7.9552 \cdot 10^{-001} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ .

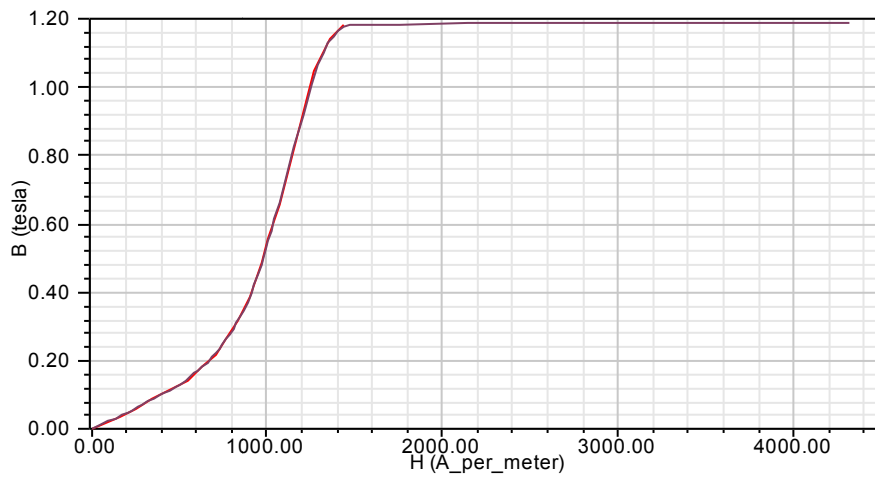


Figure IV.I.81 Courbe du Fe\_Si pour la contrainte de -74MPa

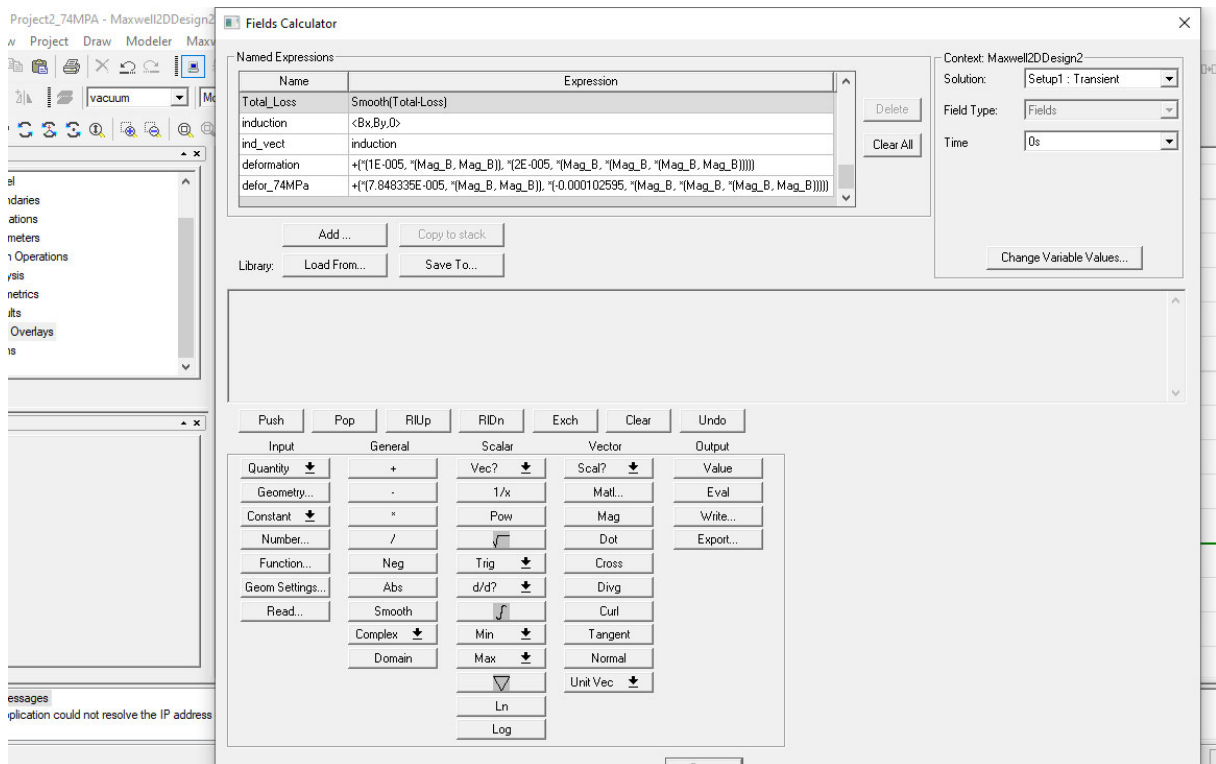


Figure IV.I.82 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -74 MPa.

1. Déformation de magnétostriction

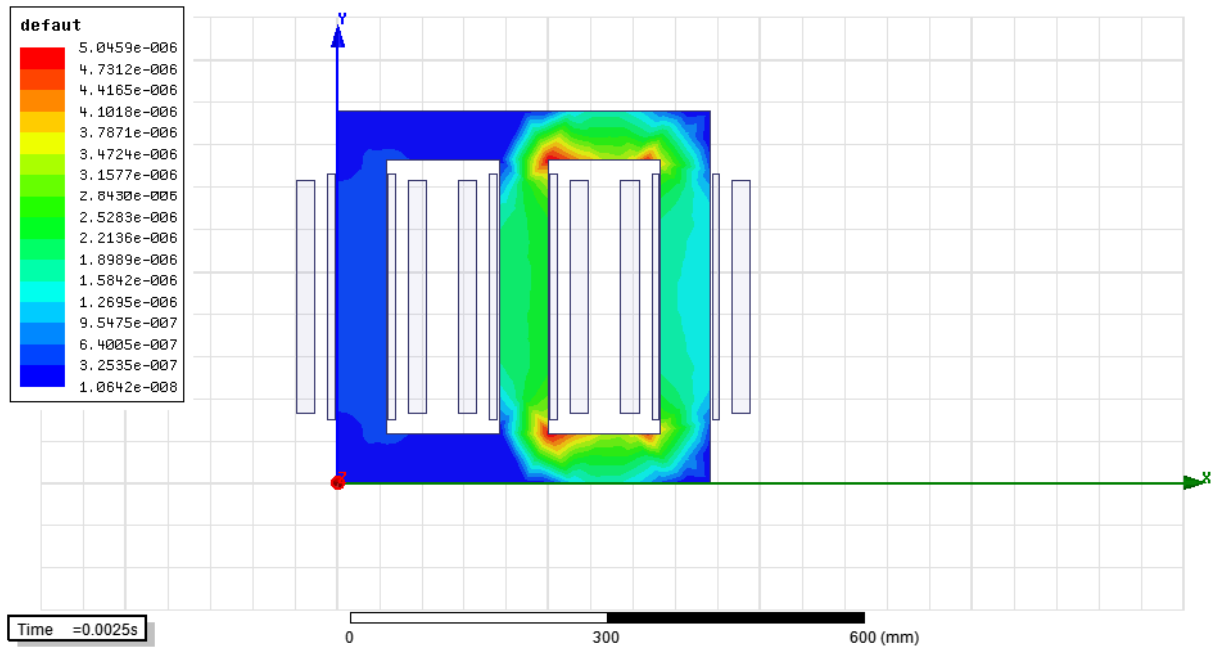


Figure IV.I.83 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$

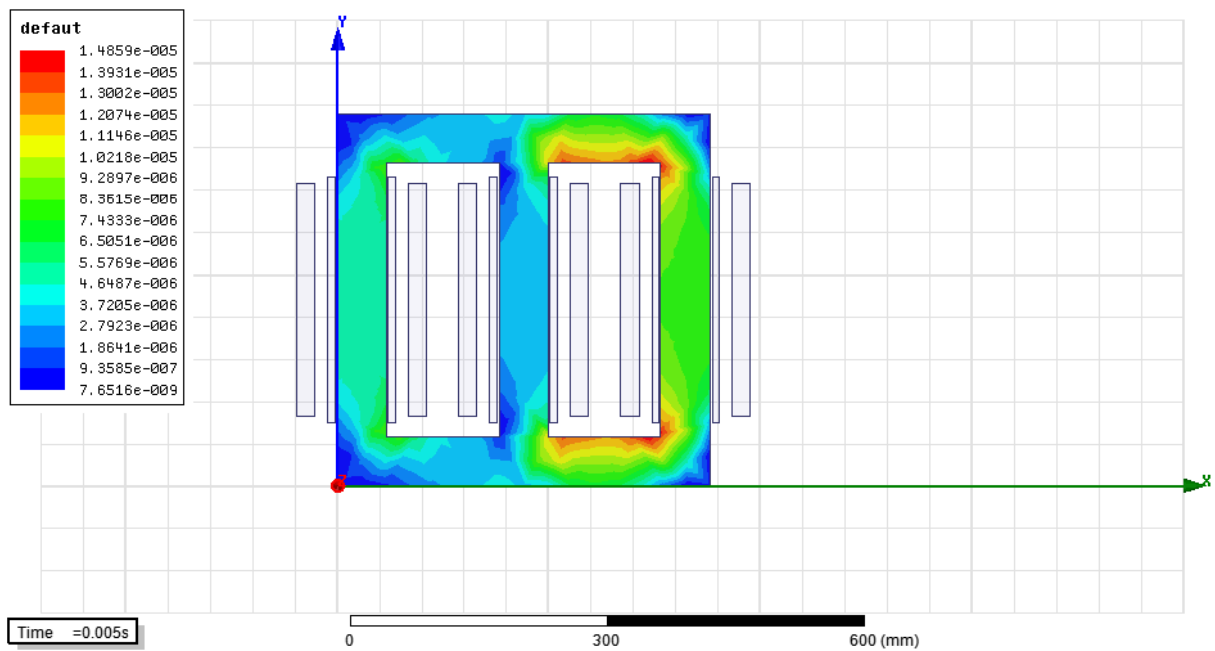


Figure IV.I.84 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$

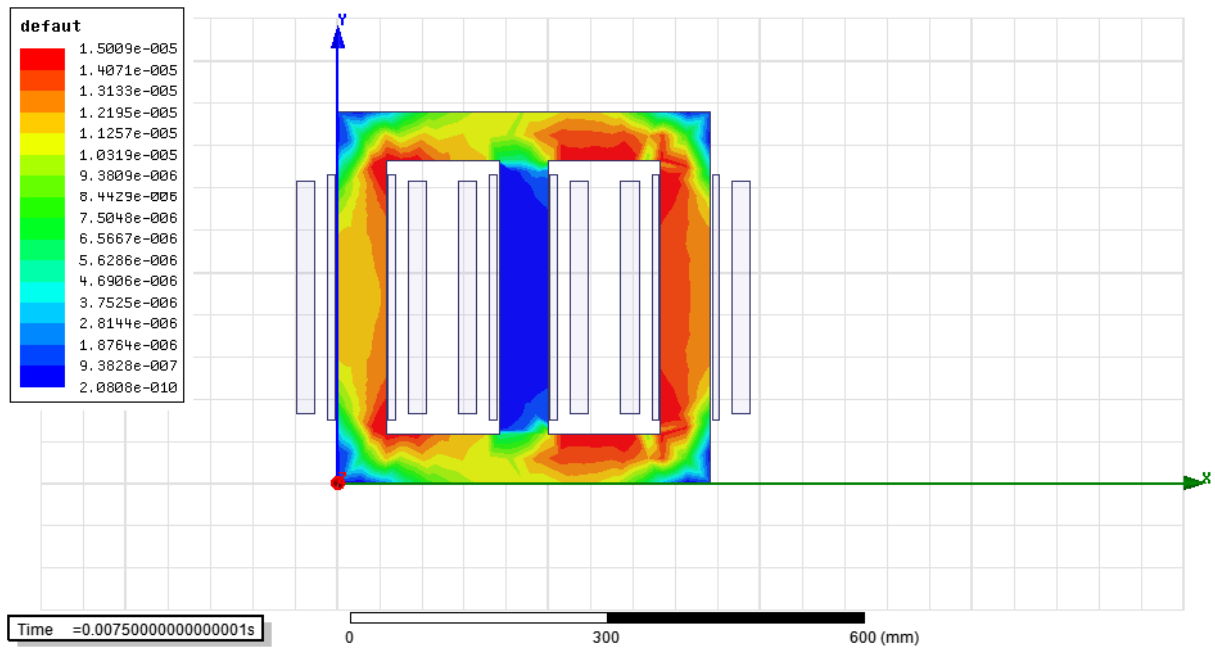


Figure IV.I.85 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$

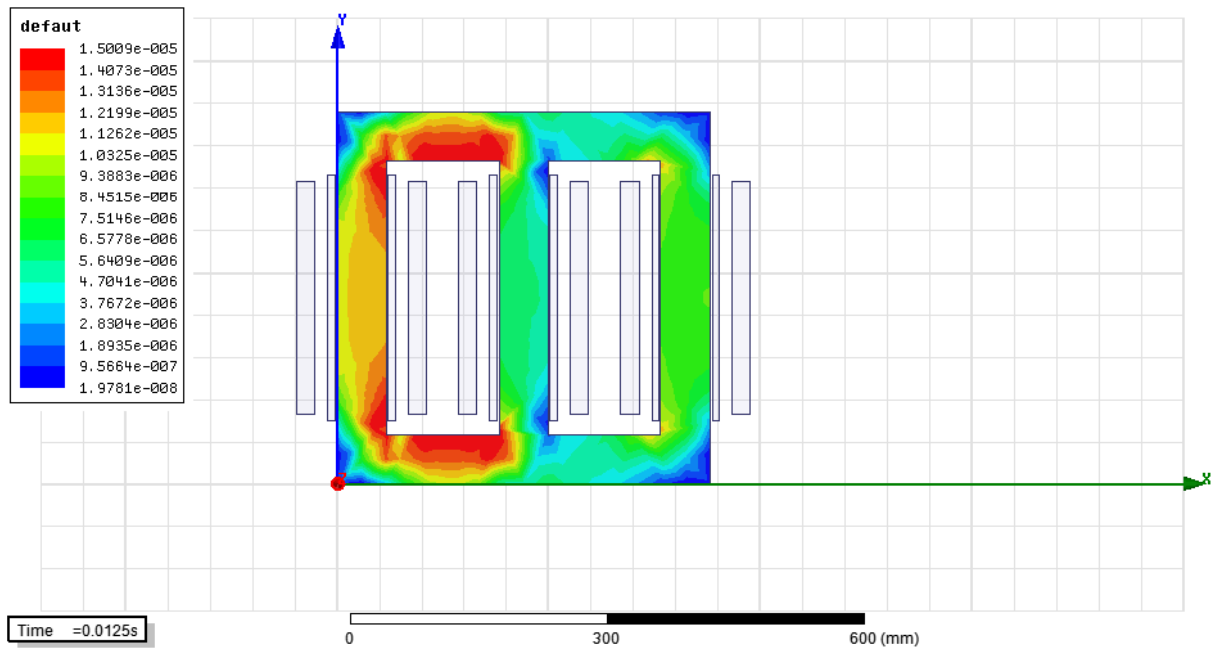


Figure IV.I.86 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$

➤ **Interprétation des figures**

La figure (IV.I. 81) caractérise la courbe d’hystérésis du matériau fer silicium réalisée sous maxwell pour une contrainte de -55Mpa.

La formulation mathématique du problème est représentée dans la figure (IV.I.82).

Les figures (IV.I.83, IV.I.84, IV.I.85 et IV.I.86) représentent respectivement la répartition de la déformation dans le circuit magnétique du transformateur.

On constate facilement une augmentation remarquable de la déformation qui atteint une valeur maximale à  $t=0.0075s$ .

## 2. Induction magnétique B

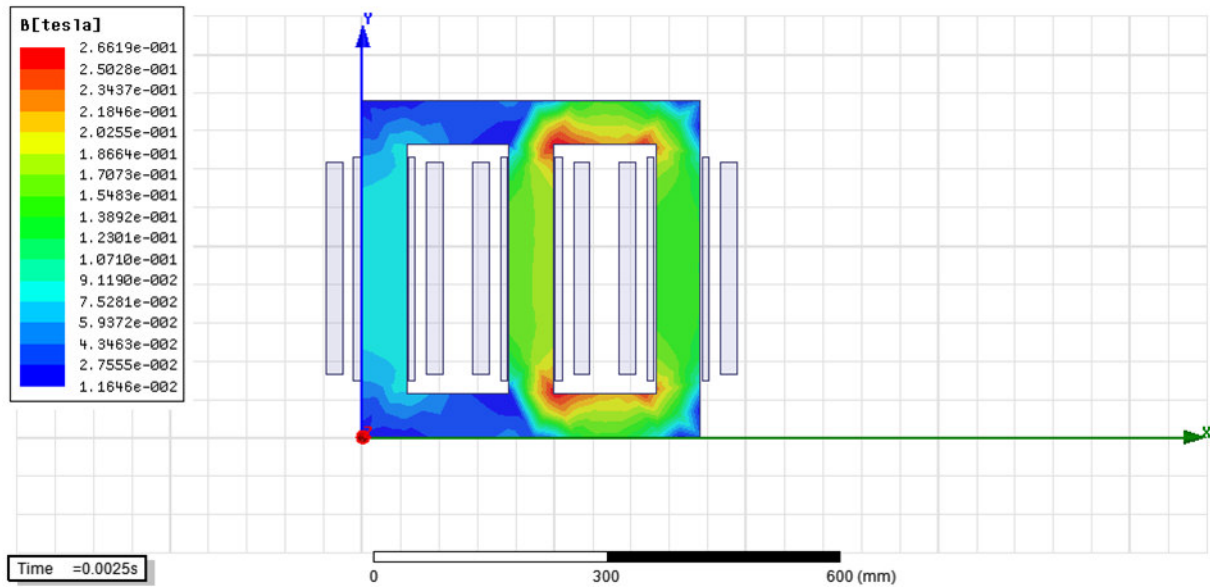


Figure IV.I.87 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$

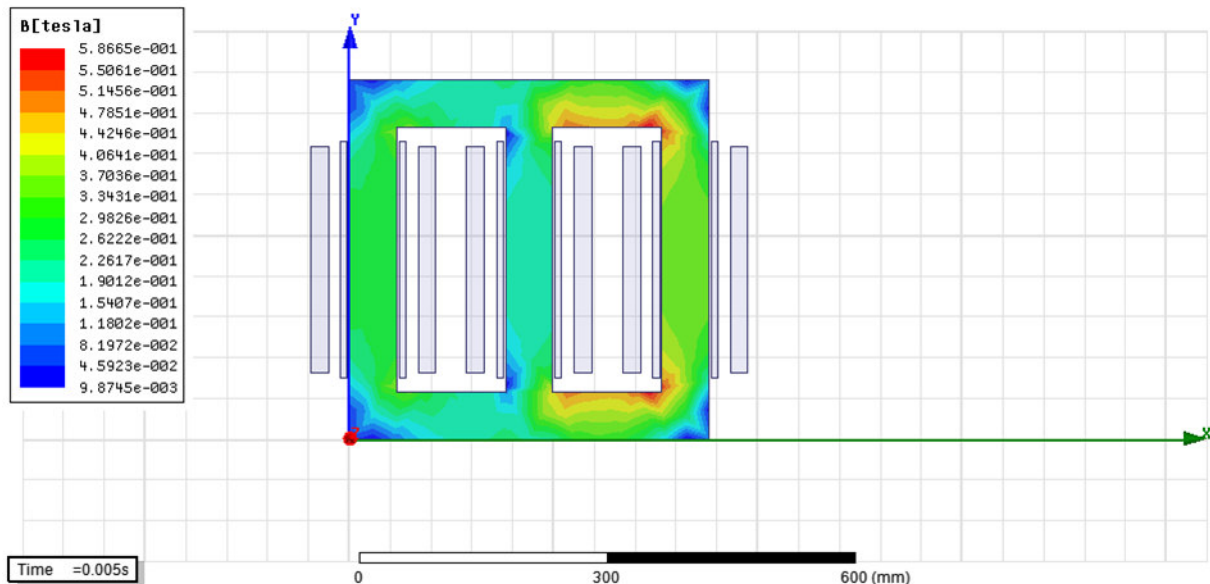


Figure IV.I.88 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$

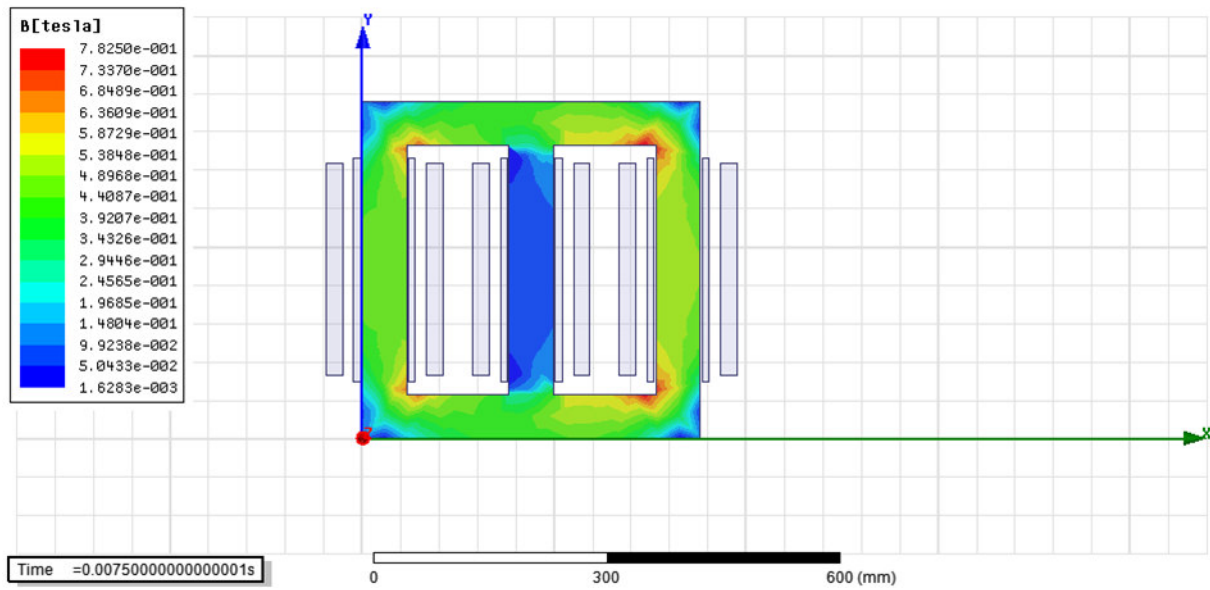


Figure IV.I.89 Induction magnétique B à t = 0.0075s

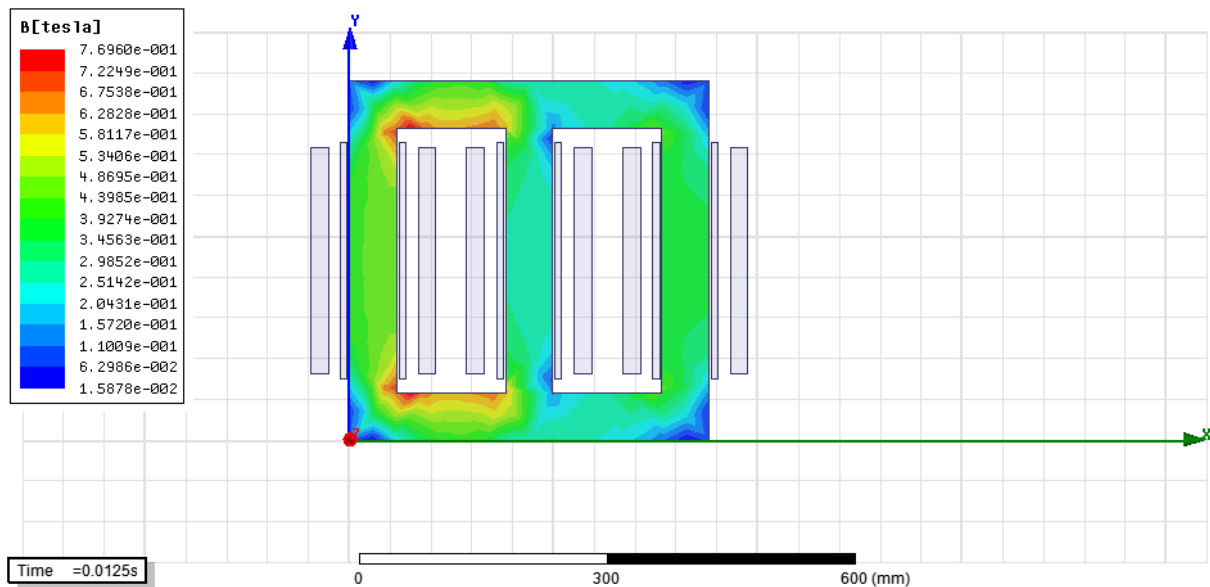


Figure IV.I.90 Induction magnétique B à t = 0.0125s

➤ **Interprétation des figures**

La figure montre une légère augmentation de la distribution de l'induction dans le circuit magnétique du transformateur, elle atteint une valeur maximale de l'ordre de  $7.9552.10^{-001} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ . On remarque qu'elle se situe principalement au niveau des angles intérieurs de la culasse magnétique.

### 3. Champ magnétique H

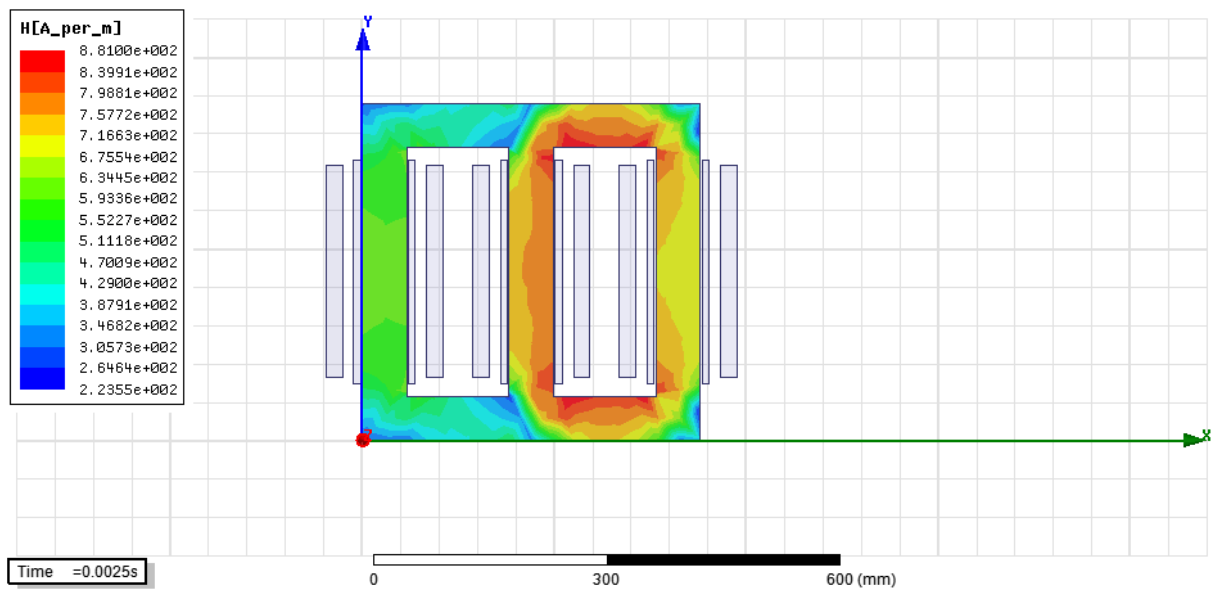


Figure IV.I.91 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$

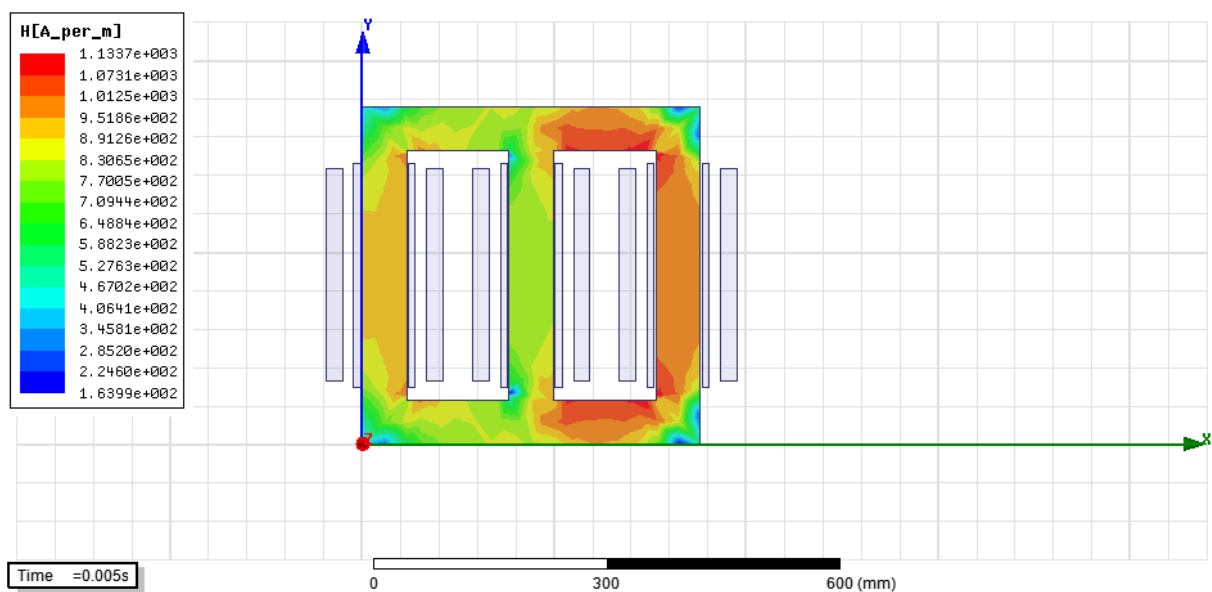


Figure IV.I.92 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$

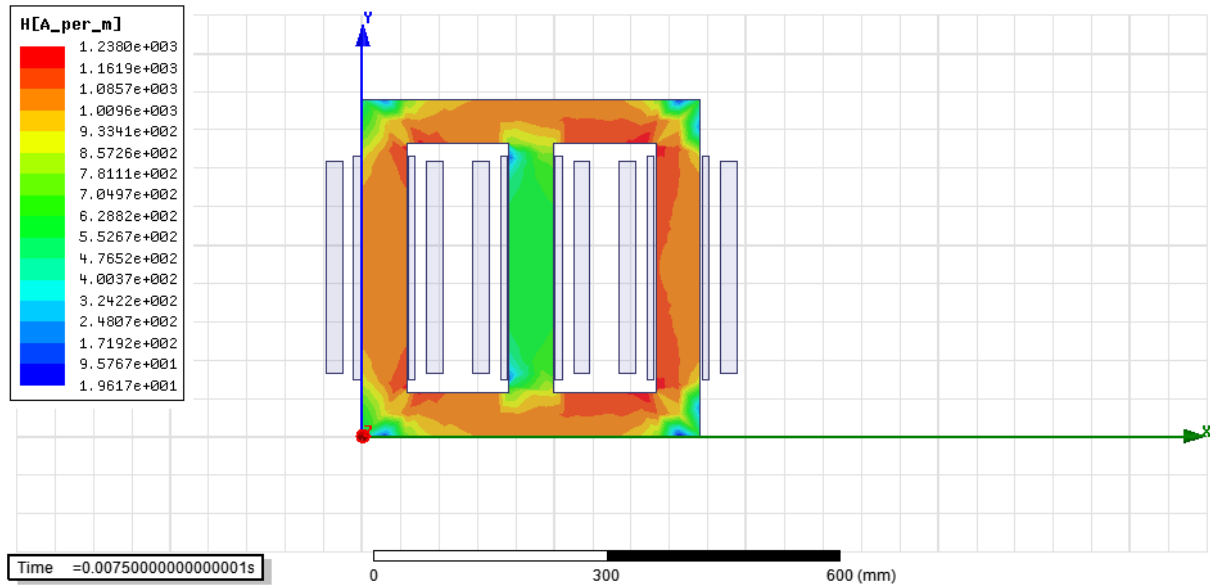


Figure IV.I.93 Distribution du champ magnétique H à t = 0.0075s

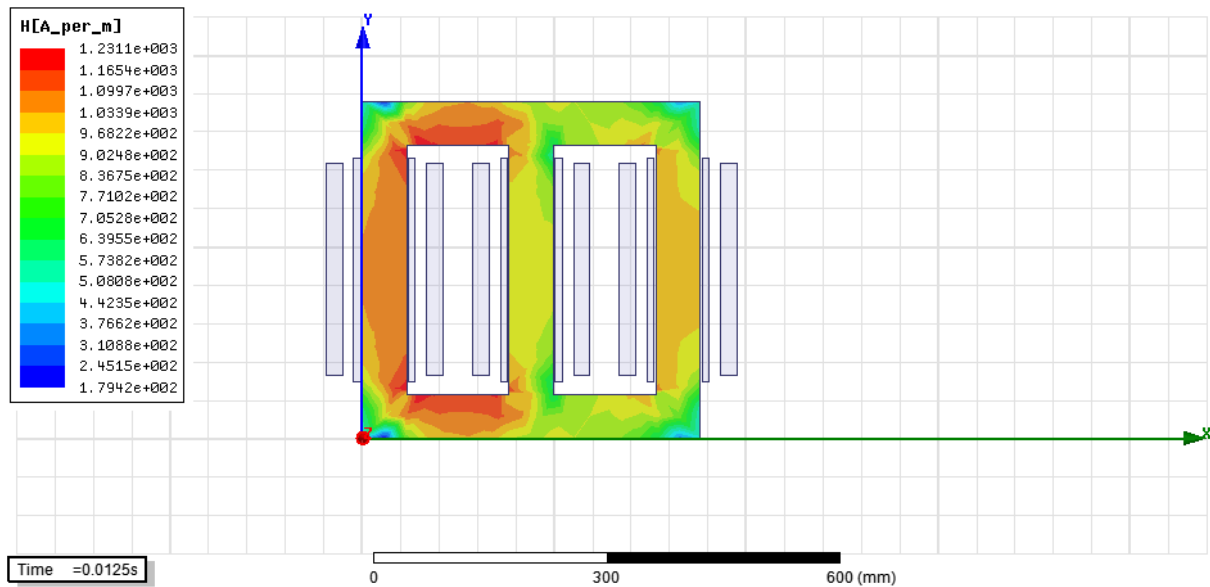


Figure IV.I.94 Distribution du champ magnétique H à t = 0.00125s

➤ **Interprétation des figures**

Les figures démontrent un accroissement considérable de la répartition du champ magnétique au niveau de la culasse du transformateur, atteignant une valeur maximale de  $1.2380 \cdot 10^{+003} [A/m]$  à  $t = 0.0075s$ .

- Il est à noter que les vecteurs de la densité des forces magnétiques gardent la même localité avec augmentation de valeurs, tandis que le potentiel vecteur magnétique A garde approximativement la même valeur.

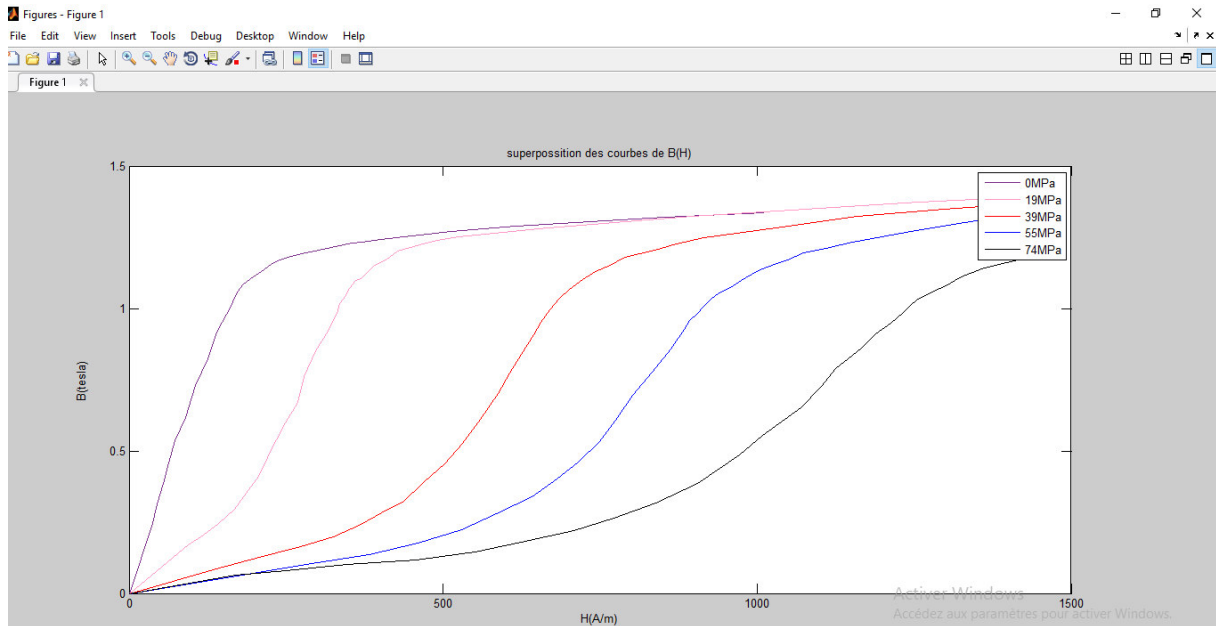


Figure IV.I.95 Les courbes d’hystérésis sous différentes contraintes de compression appliquées.

Partie II : Etude et simulation de l’influence des défauts

II.1 Déformation sous une contrainte de 0MPa avec un seul défaut

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus de l’induction et déformation, avec un défaut centré ayant comme propriété du matériau l’air.

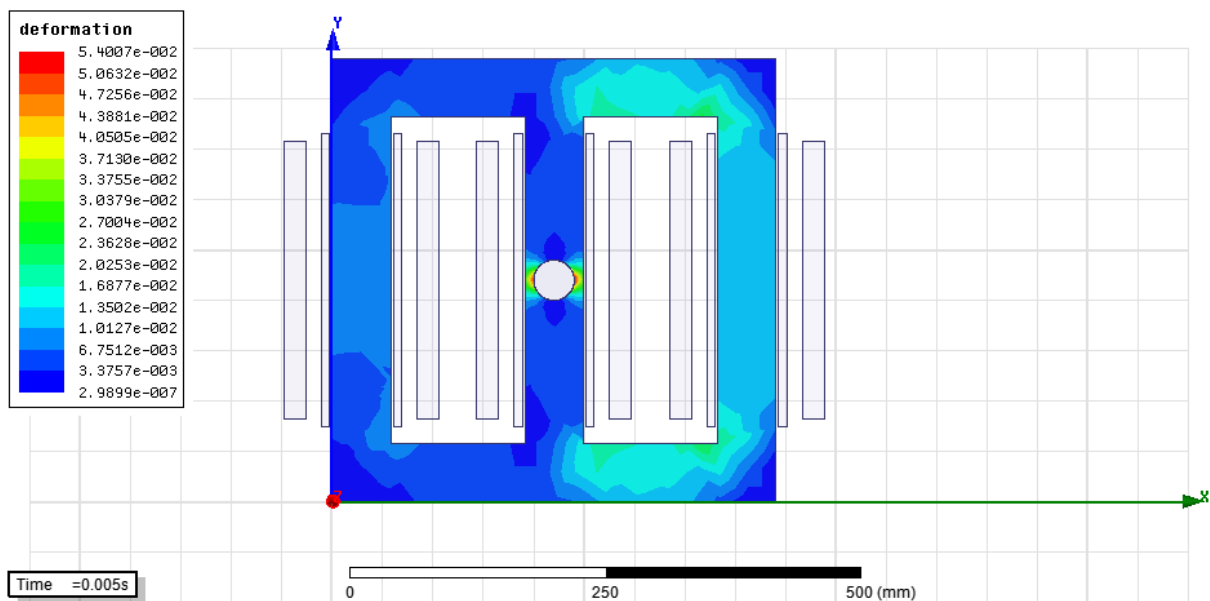


Figure IV.II.01 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t = (T / 4)$  s

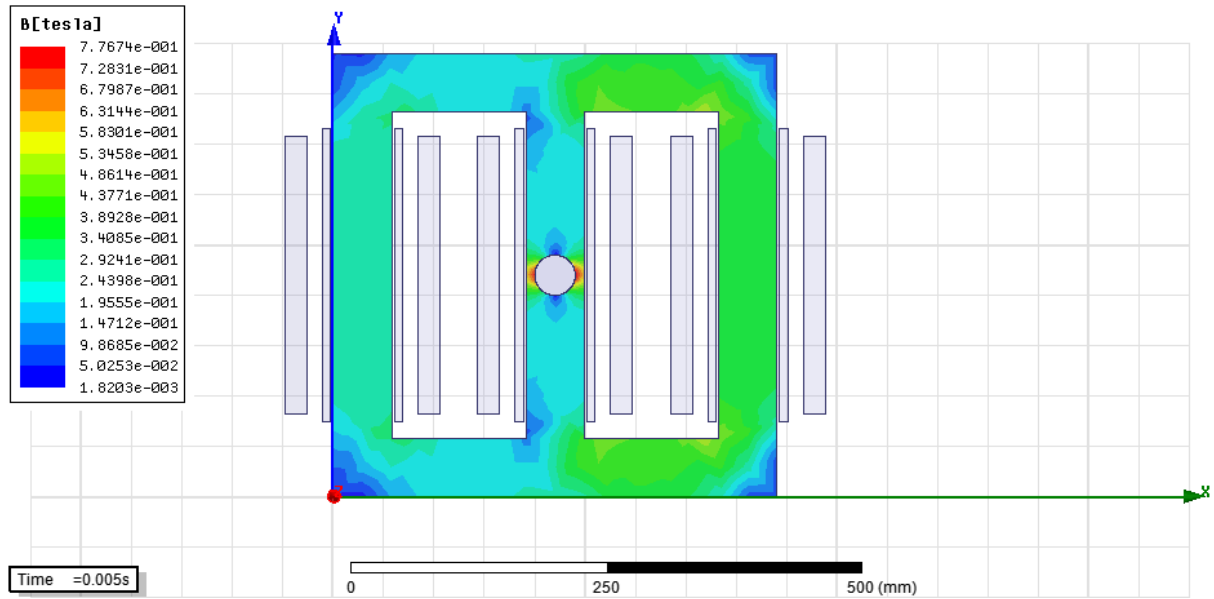


Figure IV.II.02 Induction magnétique B à  $t = (T/4)$  s.

II.2 Déformation sous une contrainte de -19 MPa avec un seul défaut

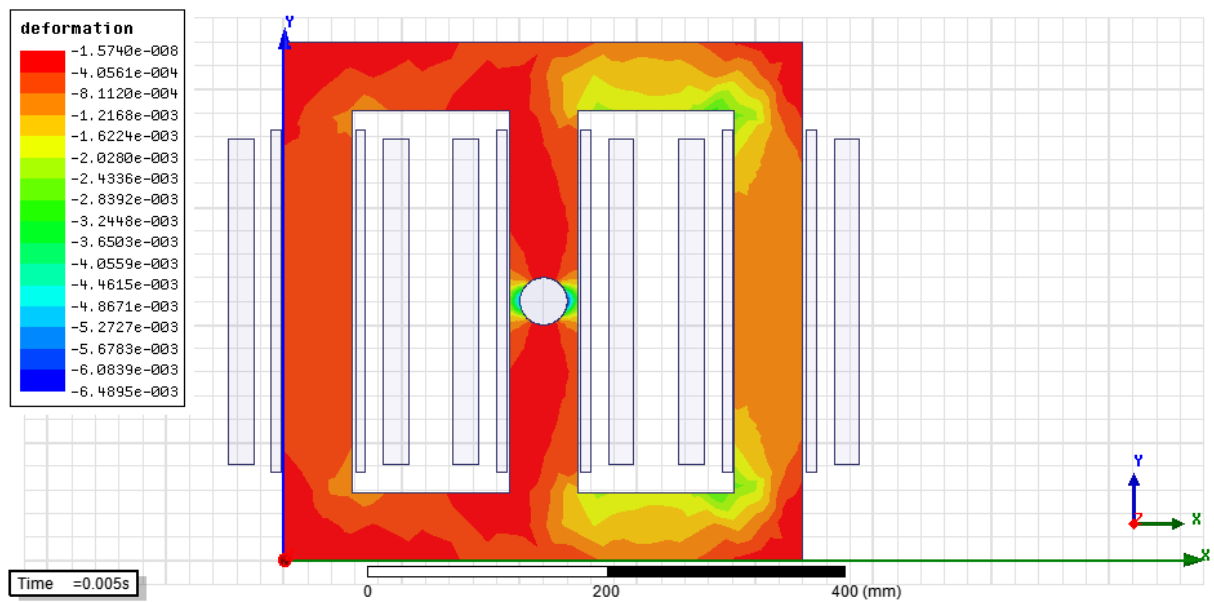


Figure IV.II.03 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

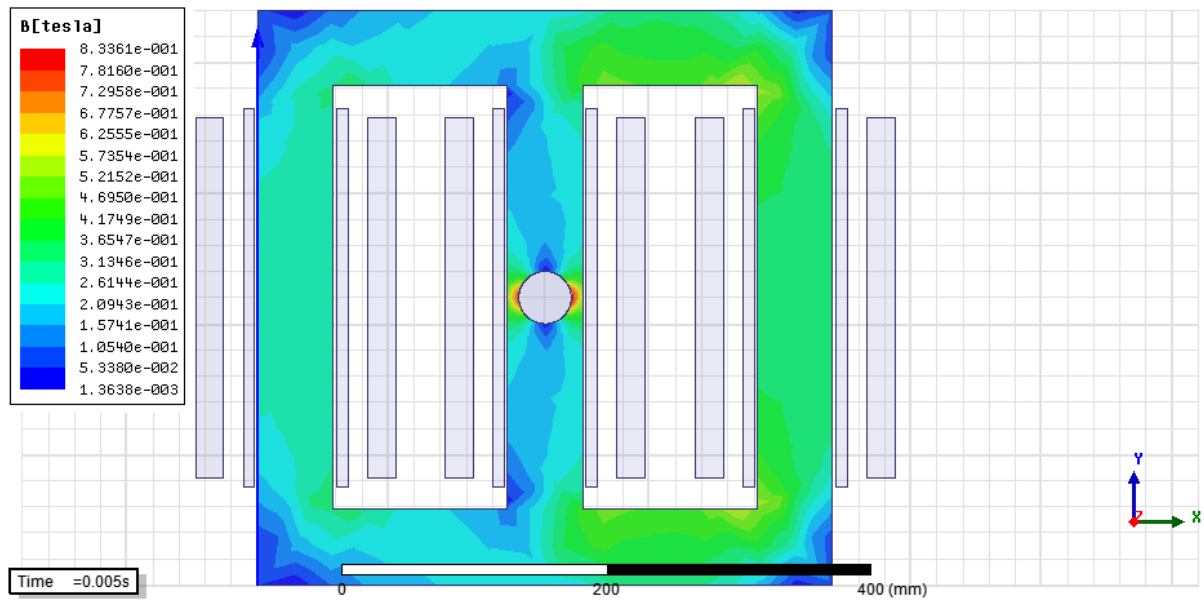


Figure IV.II.04 Induction magnétique  $B$  à  $t = (T / 4)$  s

### II.3 Déformation sous une contrainte de -39MPa

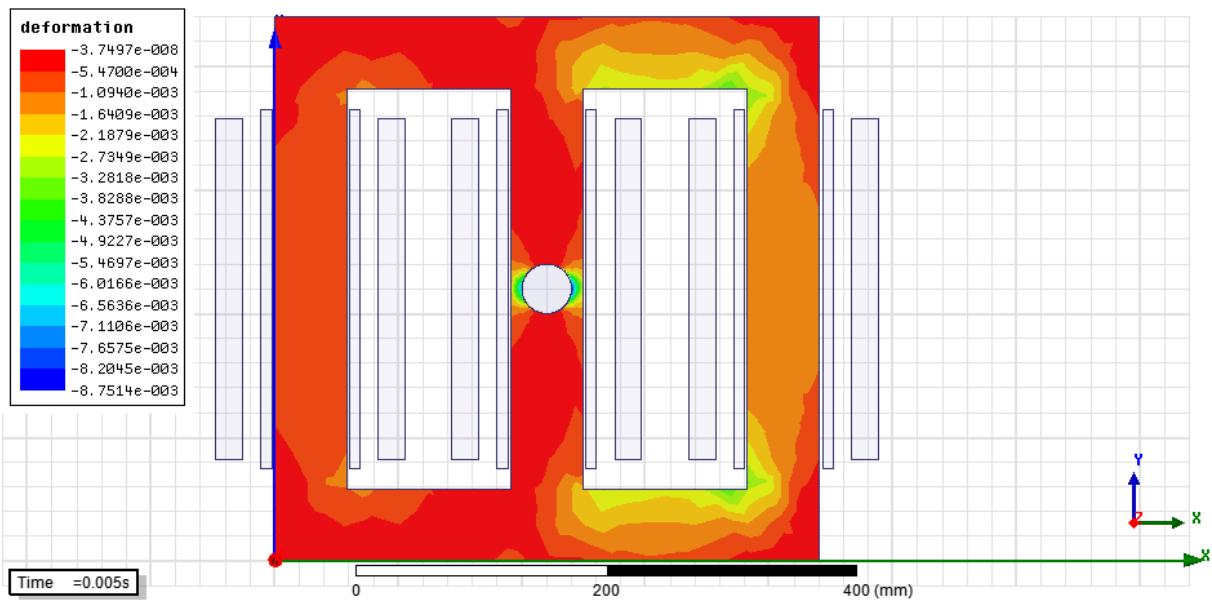


Figure IV.II.05 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

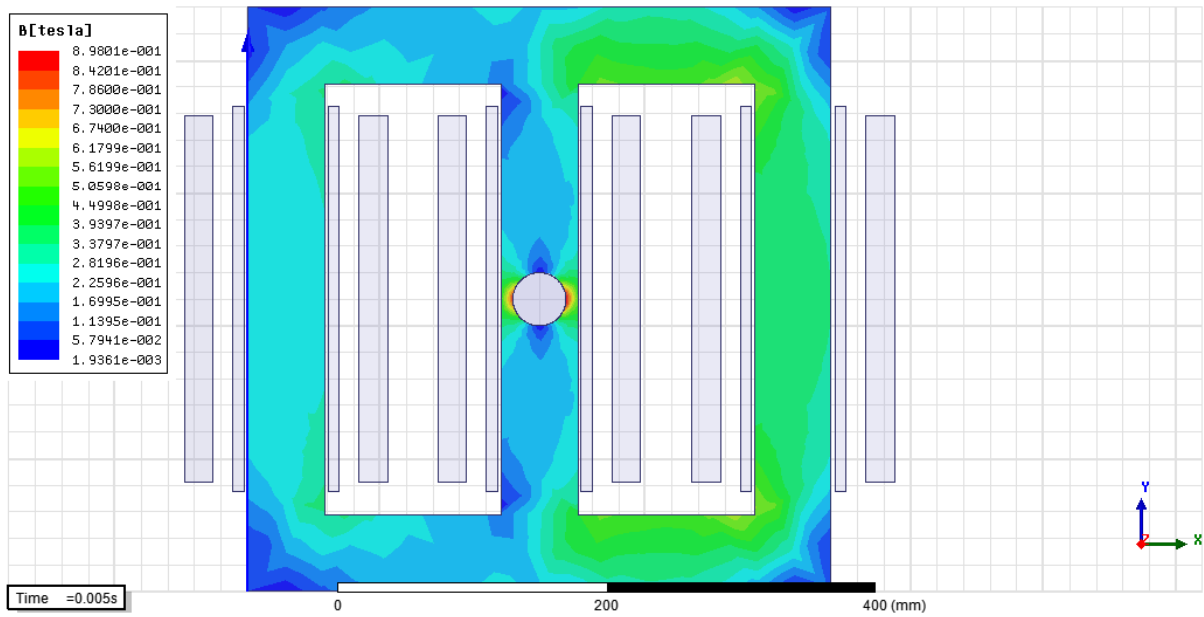


Figure IV.II.06 Induction magnétique  $B$  à  $t = (T/4)$  s

II.4 Pour une contrainte de -55 MPa

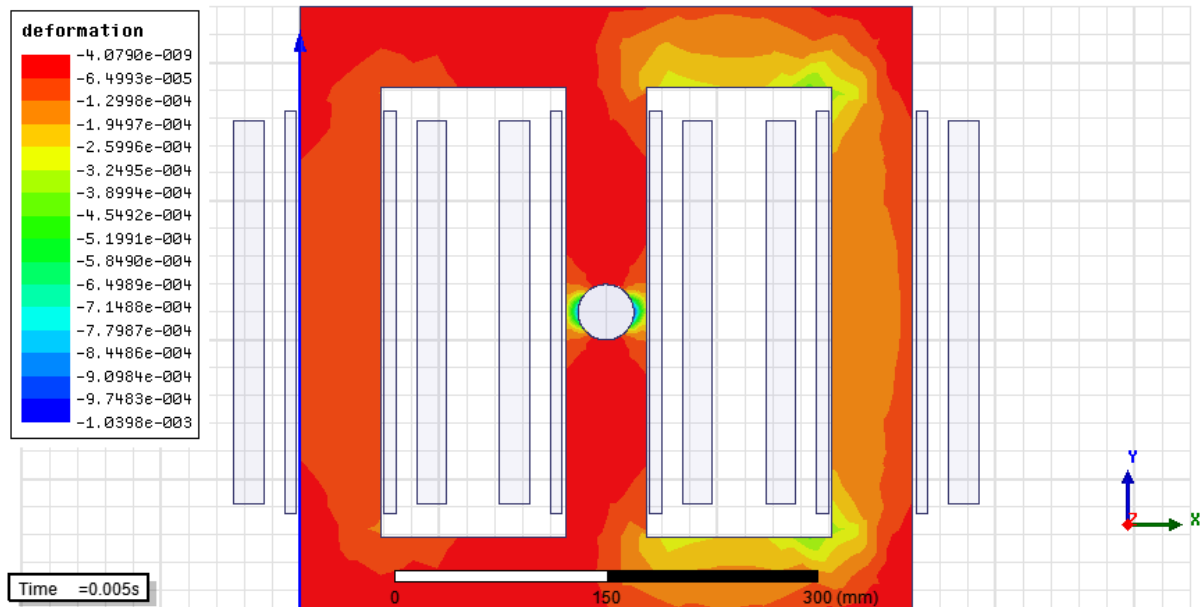


Figure IV.II.07 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

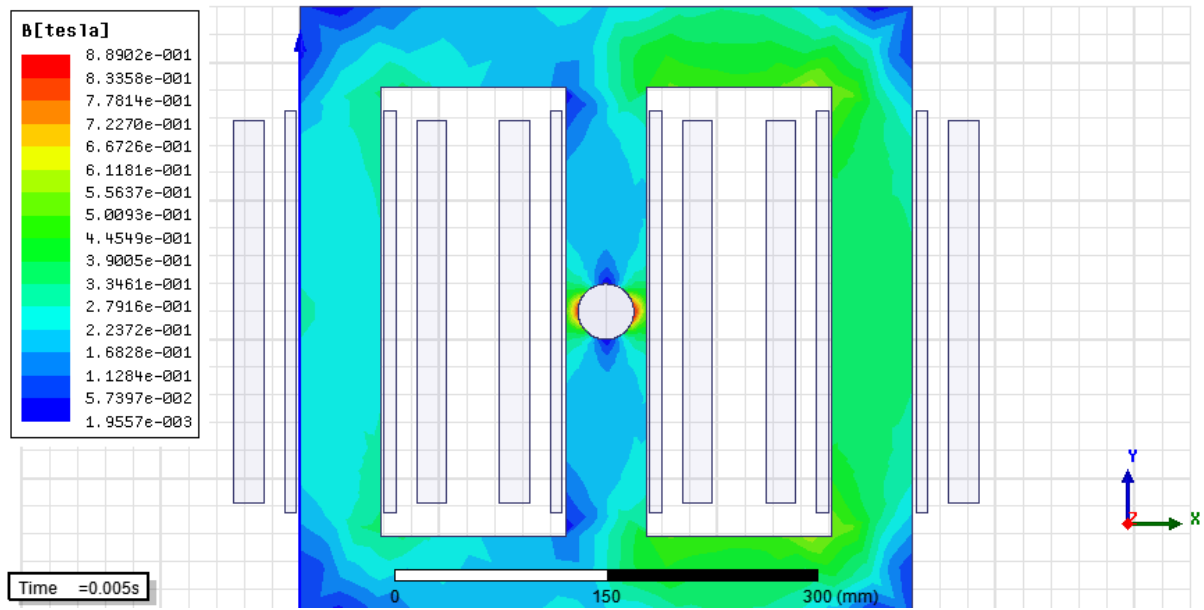


Figure IV.II.8 Induction magnétique à  $t = (T/4)$  s

II.5 Pour une contrainte de -74 MPa

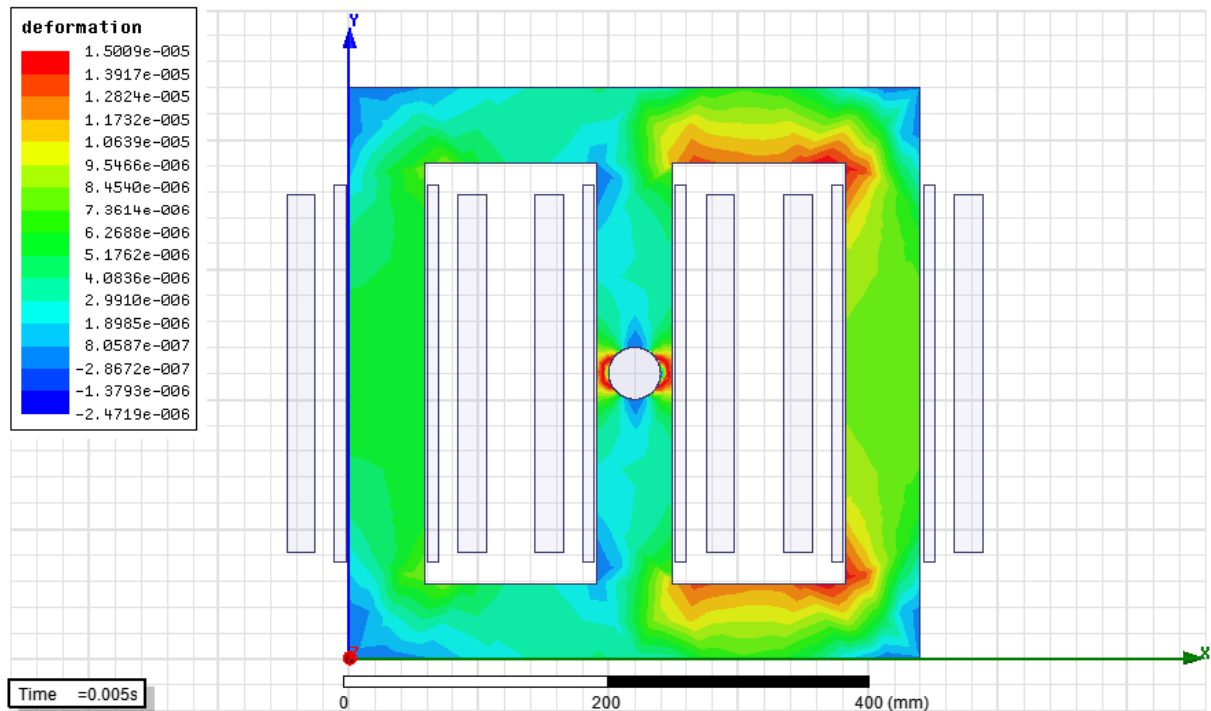


Figure IV.II.9 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

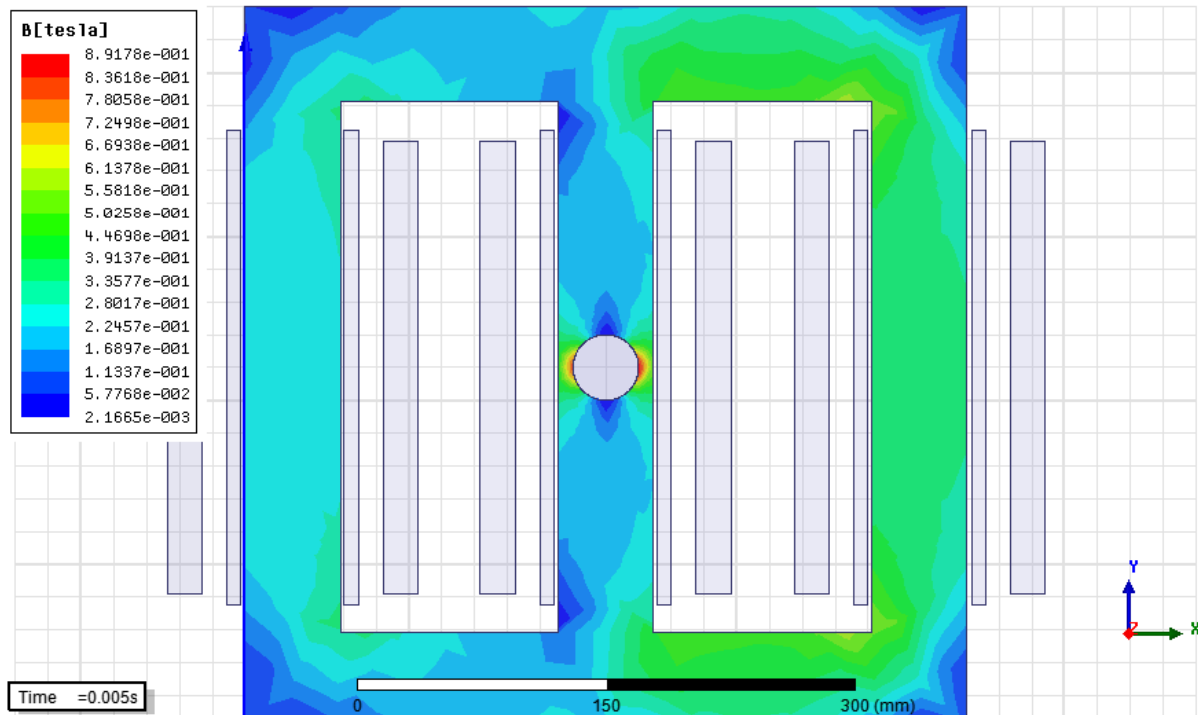


Figure IV.II.10 Induction magnétique B à  $t = (T/4)$  s

### ○ Interprétation des figures

Les figures de (IV.II.01 à IV.II.10) nous renseignent sur les résultats des répartitions respectives de la déformation et de l'induction, obtenus pour différentes contraintes subies allant de 0 à -74 MPa pour un défaut centré aux valeurs maximales définies  $t=T/4$  s.

Pour 0MPa, on remarque que les valeurs maximales de la déformation et de l'induction magnétique B entourent le défaut.

Pour -19 MPa, on constate que la déformation s'est propagée au niveau de toute la culasse avec de valeurs maximales négatives. Tandis que l'induction reste près du défaut avec une légère augmentation de valeur.

Pour -39 MPa et -55 MPa, une accentuation de la répartition de la déformation est observée. L'induction quant à elle augmente toujours au niveau de défaut.

Enfin, pour la contrainte de -74 MPa, la déformation de magnétostriction est beaucoup plus importante au niveau des arrêtes intérieures de la deuxième colonne du transformateur et du défaut avec une intensité de  $1.5 \cdot 10^{-5}$ . L'induction a légèrement augmenté.

II.6 Pour une contrainte de -19 MPa avec plusieurs défauts

Cette fois-ci nous avons pris trois défauts dont deux sont de types cercles et un polygone. Le type du matériau injecté aux défauts s'agit du titane.

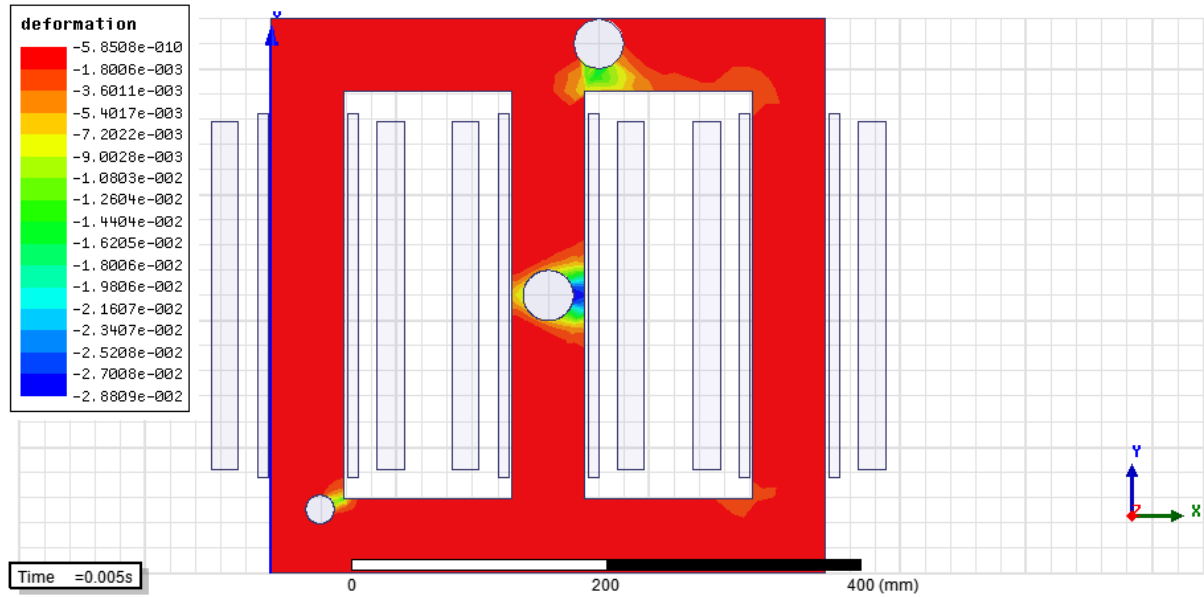


Figure IV.II.11 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

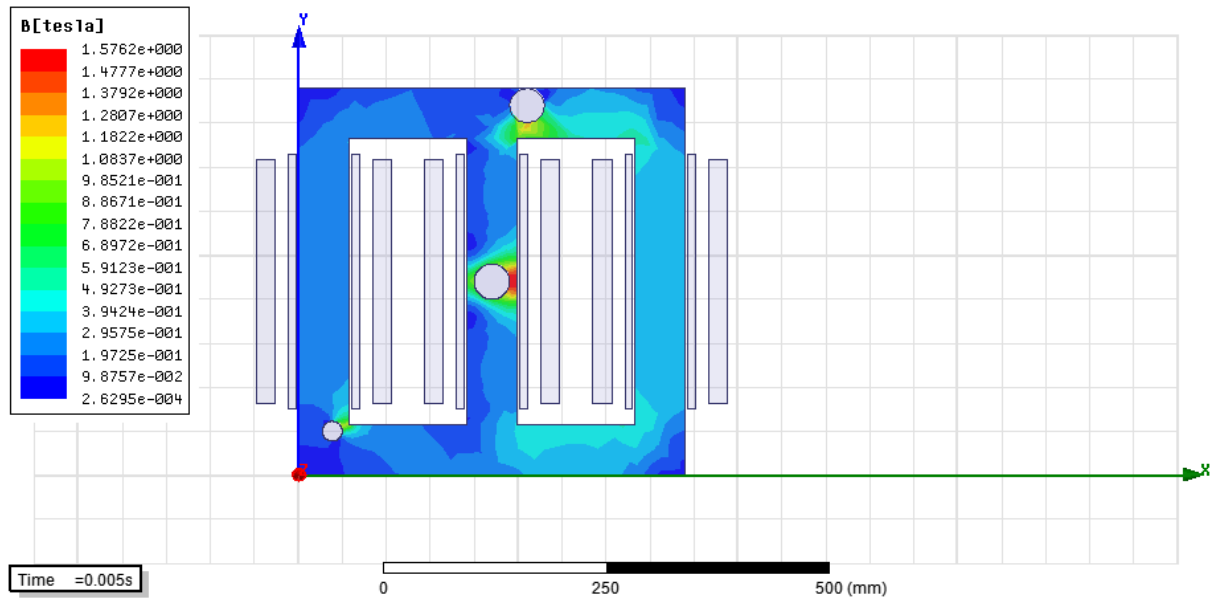


Figure IV.II.12 Induction magnétique B à  $t= (T/4)$  s

II.7 Déformation et induction sous une contrainte de 74 MPa avec plusieurs défauts

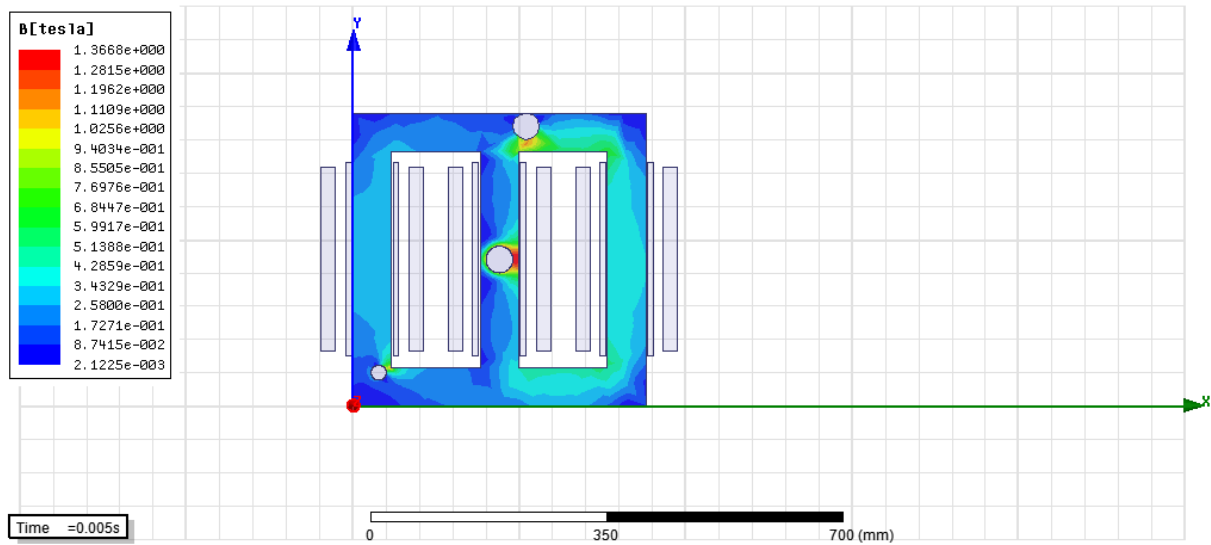


Figure IV.II.13 Induction magnétique B à  $t= (T/4) s$

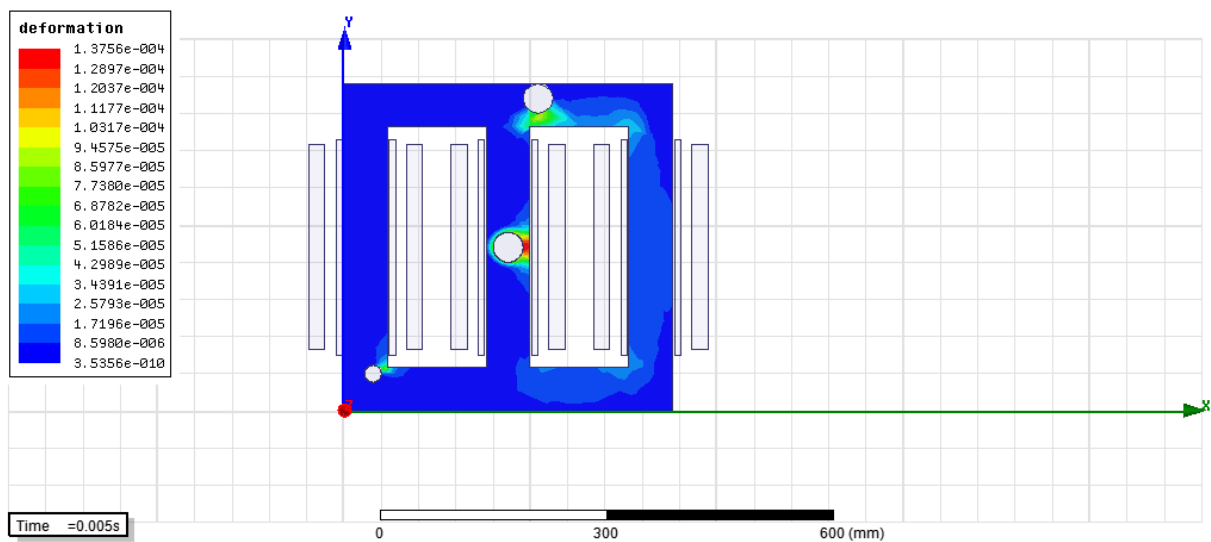


Figure IV.II.14 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4) s$

○ Interprétation des figures

Les figures (IV.II.11, IV.II.12, IV.II.13 et IV.II.14) nous renseignent sur la distribution respective de la déformation et de l'induction, obtenues pour les deux contraintes appliquées de -19MPa et -74MPa pour trois défauts et cela à un instant donné égal à T/4.

Pour -19MPa, on remarque que la déformation est importante et occupe toute la culasse magnétique avec une accentuation par rapport à la culasse n'ayant qu'un seul défaut. L'induction magnétique maximale dans le cas d'un défaut centré est différente de celle obtenue avec un seul défaut.

Pour -74MPa, la valeur maximale de la déformation se situe au niveau du défaut centré avec augmentation par rapport aux résultats précédents.

II.8 Courbe de tension induite pour -74MPa

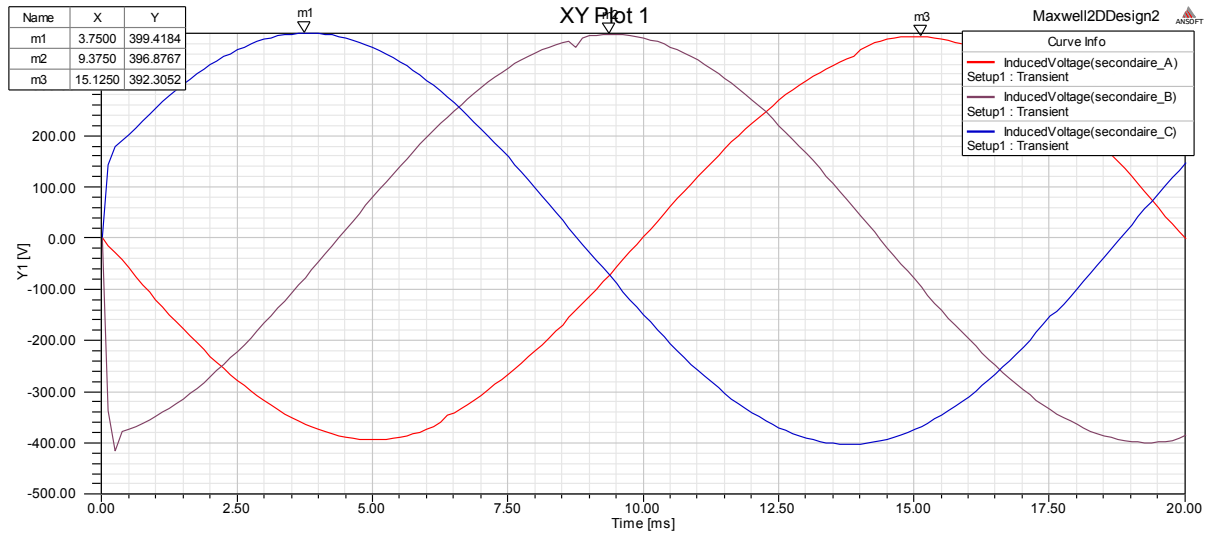


Figure IV.II.15 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Silicon\_stainless)

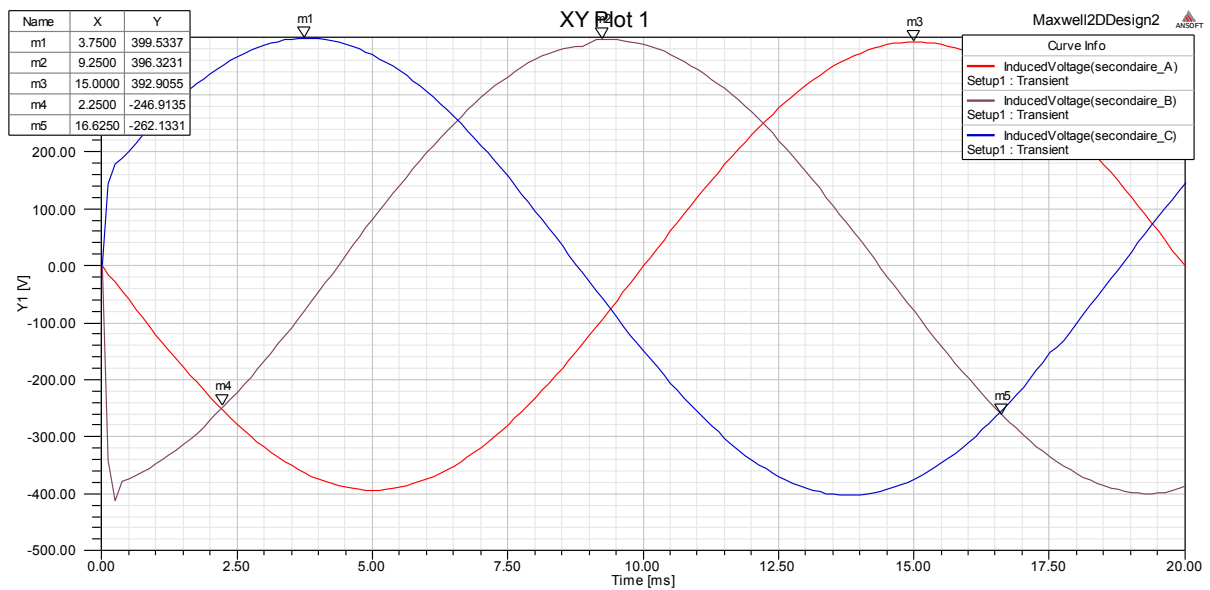
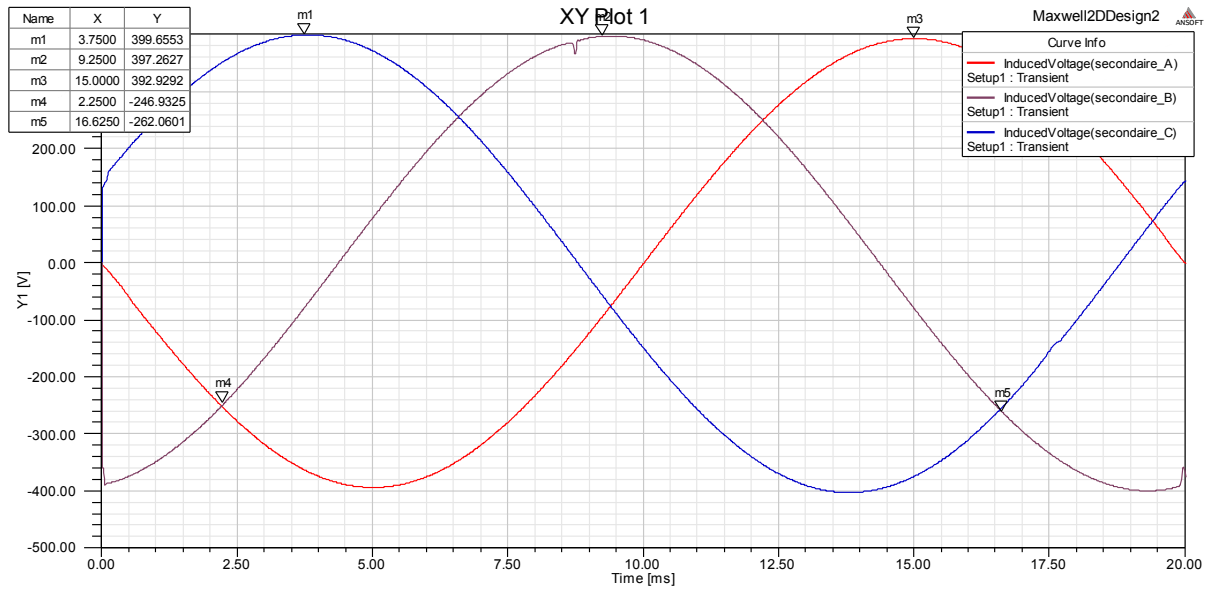


Figure IV.II.16 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Silicon\_dioxyde)



La figure IV.II.17 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Ferrite)

○ **Interprétation**

Les figures (IV.II.15 ; IV.II.16 ; IV.II.17) nous montrent les allures de la tension en fonction du temps obtenues pour un modèle avec des défauts de différentes tailles et de différents matériaux injectés.

Les courbes de tension résultantes avec le modèle ayant des défauts démontrent une légère diminution de l'ordre de 1 volt par rapport à celles obtenues précédemment.

L'allure des courbes a pris une forme différente principalement au niveau de la deuxième phase avec une légère déformation de la sinusoïde ; ce-ci revient au défaut se situant près de la deuxième colonne.

○ Comparaison de la déformation de magnétostriction avec et sans défauts

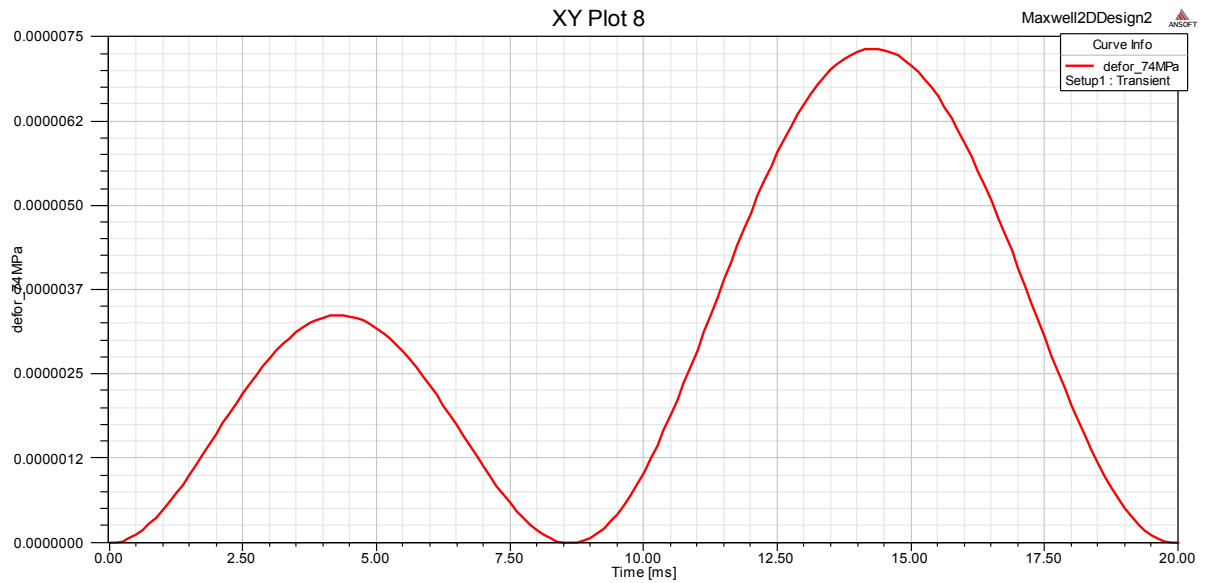


Figure IV.II.18 La déformation de magnétostriction de la culasse sans défauts sous une contrainte de -74MPa

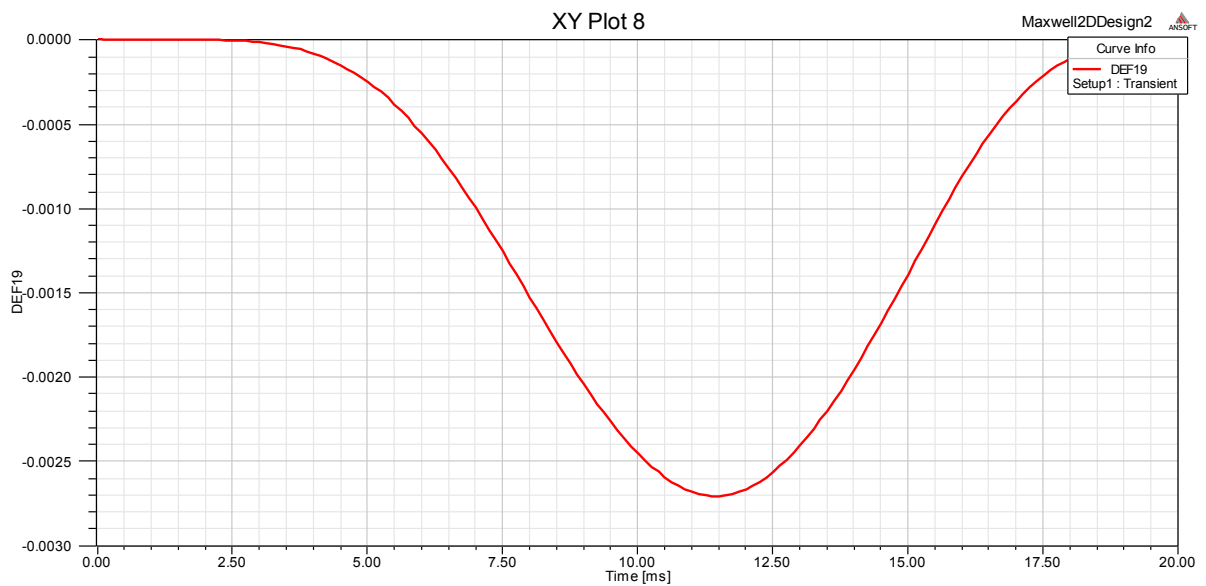
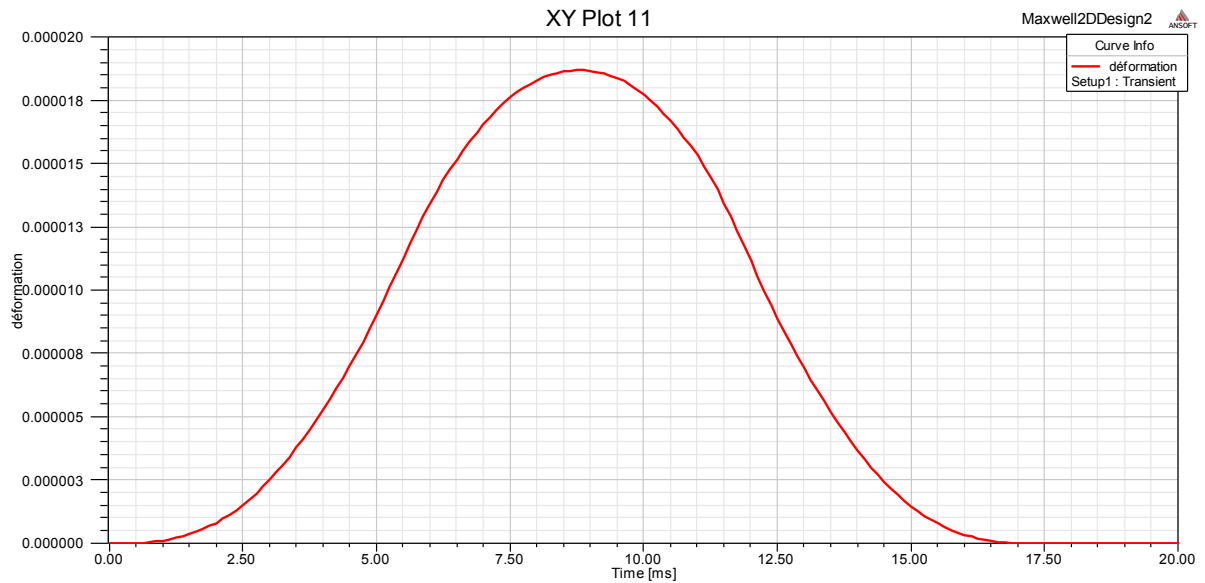


Figure IV.II.19 La déformation de magnétostriction de la culasse avec défauts sous une contrainte de -19MPa



**Figure IV.II.20 La déformation de magnétostriction de la culasse avec défauts sous une contrainte de -74MPa**

➤ **Interprétation des résultats**

En comparant les figures (IV.II.18 et IV.II.20), on remarque que les défauts influent sur la variation de la déformation.

La figure (IV.II.18) illustre l'influence du champ magnétique sur la variation de la déformation, c'est l'effet Joule.

Les figures (IV.II.19 et IV.II.20) montrent qu'il existe une relation entre les contraintes appliquées et la variation de la déformation. C'est l'effet inverse (Villari).

## APPLICATION 3

### III Couplage magnéto-mécanique

#### III.1 Introduction

ANSYS Maxwell est un logiciel de grande qualité doté d'une interface de calcul multi-physique, intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits électriques.

Destiné aux ingénieurs, cet outil offre la possibilité de concevoir et d'analyser les dispositifs électromagnétiques et électromécaniques en 2D et 3D, y compris les moteurs, les actionneurs, les transformateur, etc.

Afin de résoudre les problèmes liés aux champs électriques et aux champs électromagnétiques statiques, à domaine de fréquence et à temps variable, ANSYS Maxwell utilise une méthode de calcul très précise qui n'est rien d'autre que la méthode des éléments finis.

Ci-dessous les étapes du travail réalisé sous la partie AnsysMechanical 3D.

#### ▪ **Déclaration des propriétés de la tôle (Fe-si)**

Nombre d'éléments maillés : 4427.

Masse volumique : 7450 kg/m<sup>3</sup>.

Résistivité :  $4.7 \cdot 10^{-4}$  ohm.m.

Module de Young : 140 GPa.

Coefficient de poisson : 0.265.

Epaisseur de la tôle : 0.3 mm.

#### ▪ **Forces et courants injectés**

Force suivant (OX) : 0.00057739 newton.

Force suivant(OY) : -0.00062436 newton.

Courant nominal primaire : 0.96 A.

Courant nominal secondaire : 72.2 A.

#### III.2 Maillage

La figure IV.III.01 représente le maillage éléments finis d'une tôle magnétique d'une épaisseur de 0.3mm du transformateur étudié sous l'interface AnsysMechanical 3D.

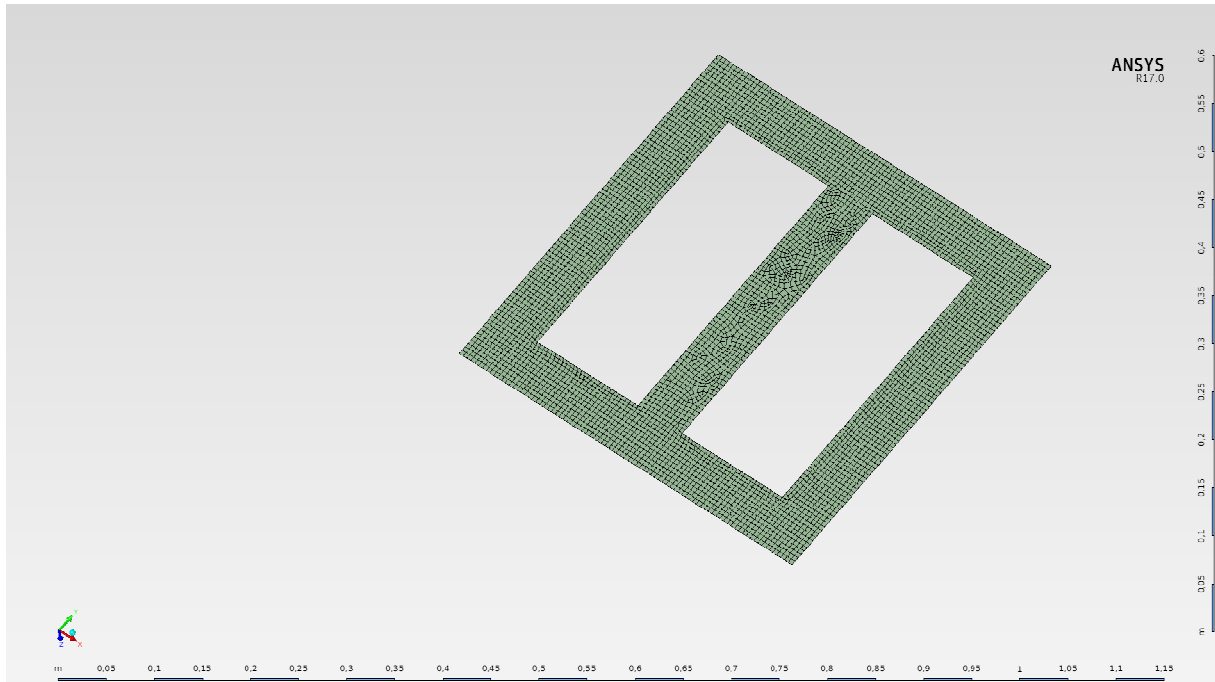
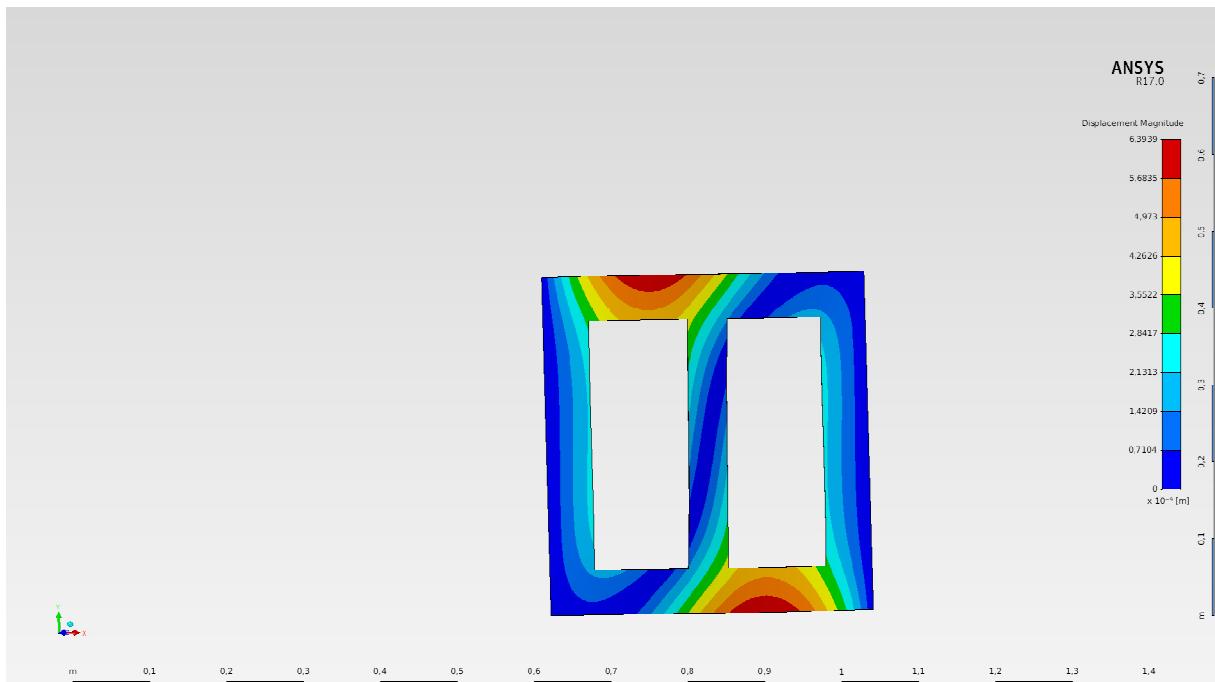


Figure IV.III.01 Maillage éléments finis

### III.3 Amplitude du déplacement



FigureIV.III.02 Amplitude du déplacement de la déformation

La figure IV.III.02 nous renseigne sur les différentes amplitudes de déplacement de la déformation, on peut distinguer une diversification d’endroits pour différentes valeurs.

On remarque des amplitudes de l'ordre de  $6.3939 \cdot 10^{-9}$  m et  $5.6835 \cdot 10^{-9}$  m au niveau des culasses supérieures et inférieures.

### III.4 Représentation de la contrainte

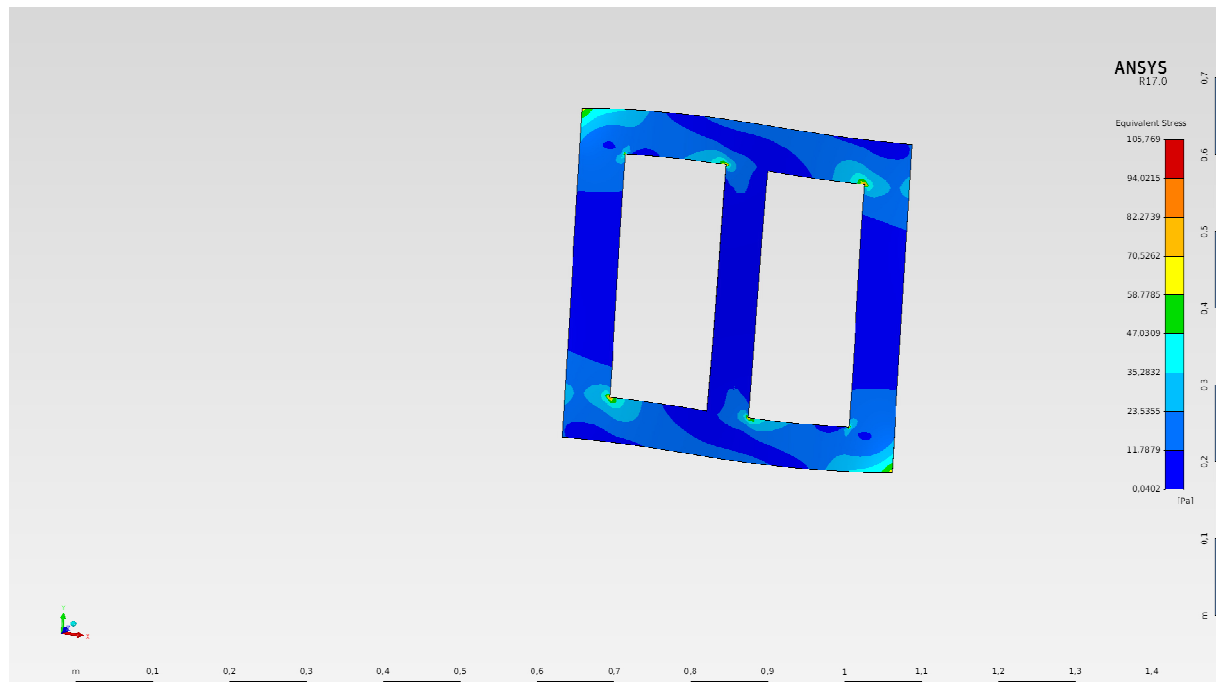
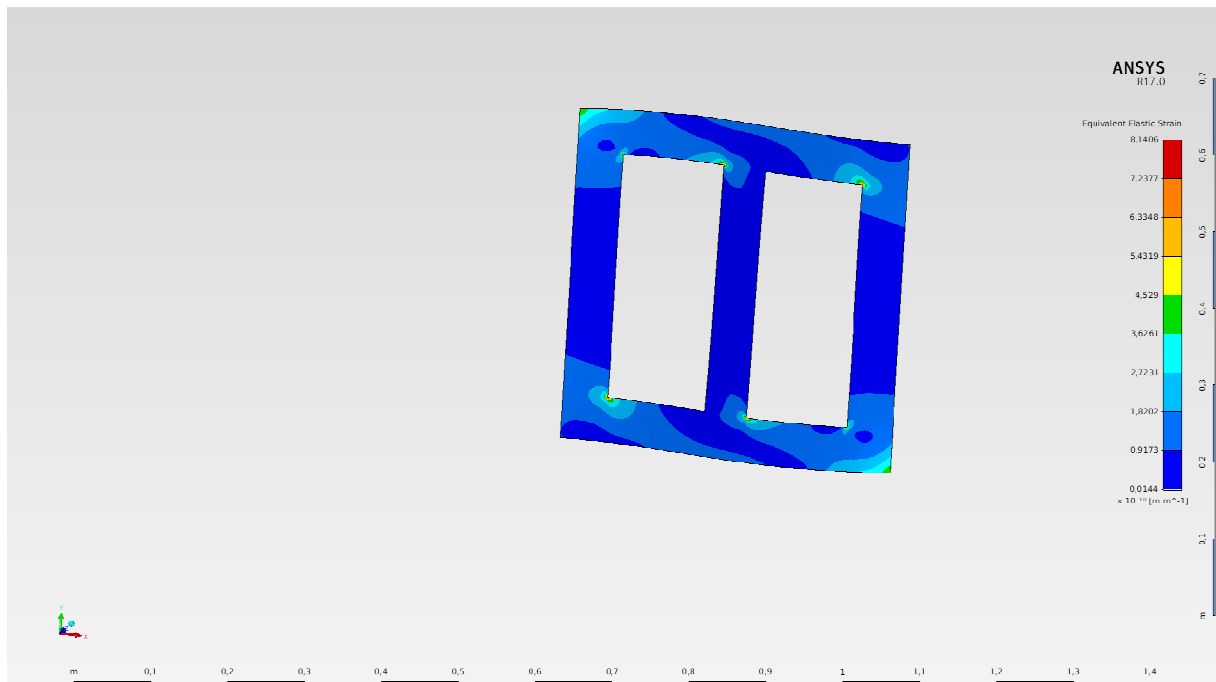


Figure IV.III.03 Distribution de la tôle sous l'effet de la contrainte

L'allure de la tôle magnétique sous l'action de la contrainte est montrée en figure IV.III.03. Une concentration à certains niveaux est clairement observée, la contrainte atteint des valeurs maximales de l'ordre de 105.769 Pa et 70.5262 Pa.

## III.5 Représentation de la déformation élastique

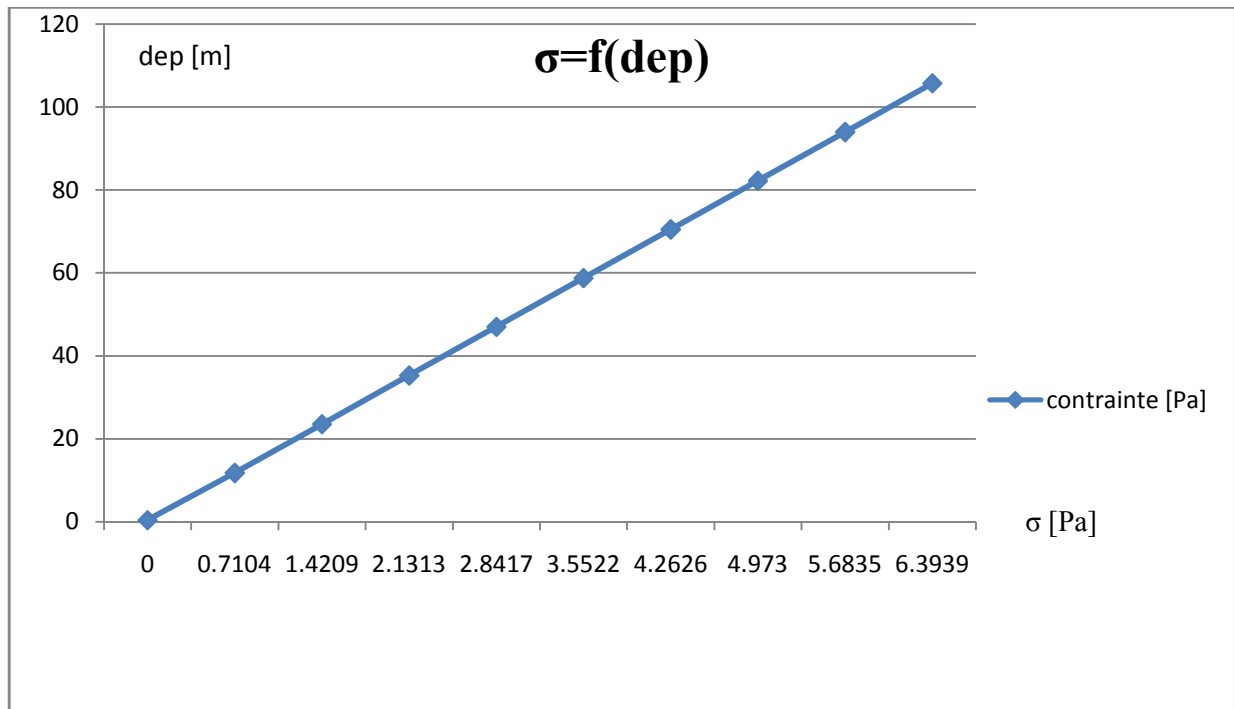


FigureIV.III.04 Déformation élastique de la tôle

Après avoir subit une déformation élastique, la tôle magnétique prend un aspect montré en figure IV.III.04.

On voit que la déformation atteint des valeurs maximales au niveau des pointes de la tôle dans une plage allant de  $3.6261.10^{-16} \text{ m.m}^{-1}$  à  $8.1406.10^{-16} \text{ m.m}^{-1}$ .

### III.6 Représentation de la contrainte en fonction du déplacement



FigureIV.III.05 Allure de la contrainte

La figure (IV.III.05) englobe la variation de la contrainte en fonction de l'amplitude du déplacement. Celle-ci représente une droite croissante, qui en premier temps prends des valeurs négligeables pour de faibles valeurs du déplacement. La droite augmente progressivement atteignant une valeur maximale de 105.769 Pa.

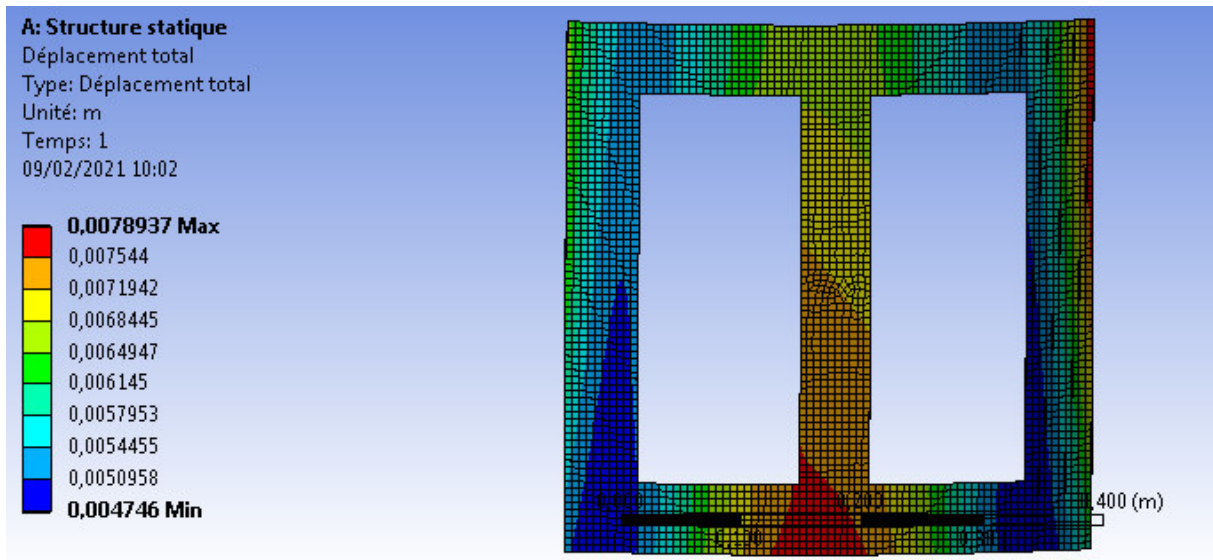
#### Partie 2 Effet de contrainte de traction

Après avoir vu le couplage magnéto-mécanique, nous nous sommes intéressé a l'étude de l'effet qu'aurait une contrainte mécanique extérieure qui n'est rien d'autre que la traction.

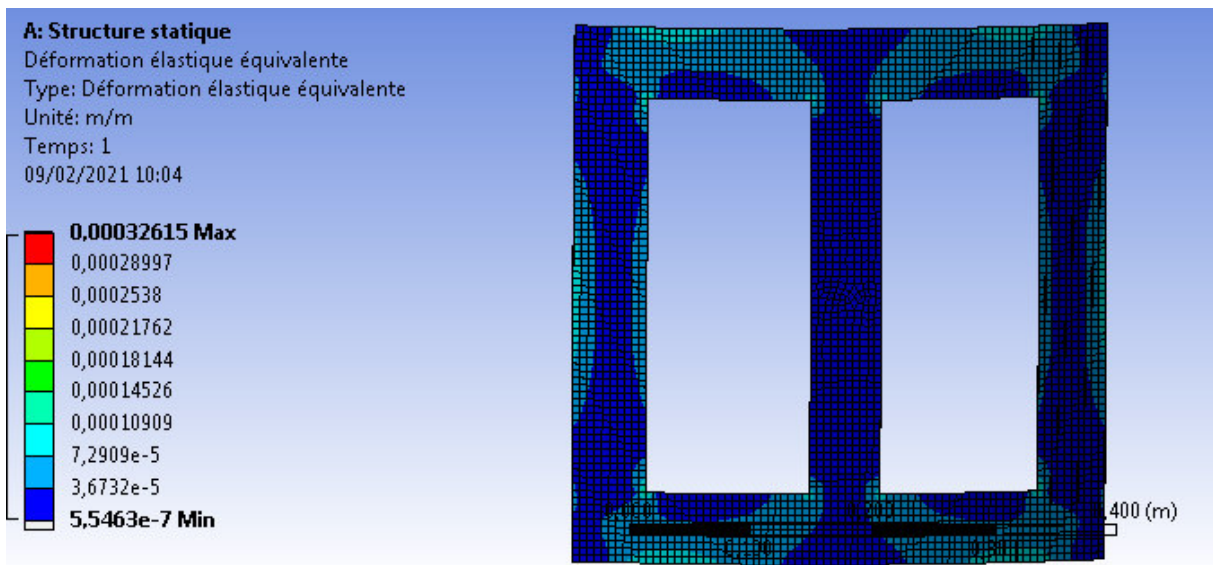
Nous avons en un premier temps, sous le logiciel établi deux plans des deux cotés droit et gauche de la tôle magnétique sur lesquels nous avons appliqué une force de 100N.

En un second temps, nous avons appliqué une force de l'ordre de 10000N.

Les résultats recueillis sont illustrés dans les figures ci-dessous.



FigureIV.III.06 Amplitude de déplacement de la force de traction



FigureIV.III.07 Déformation élastique équivalente

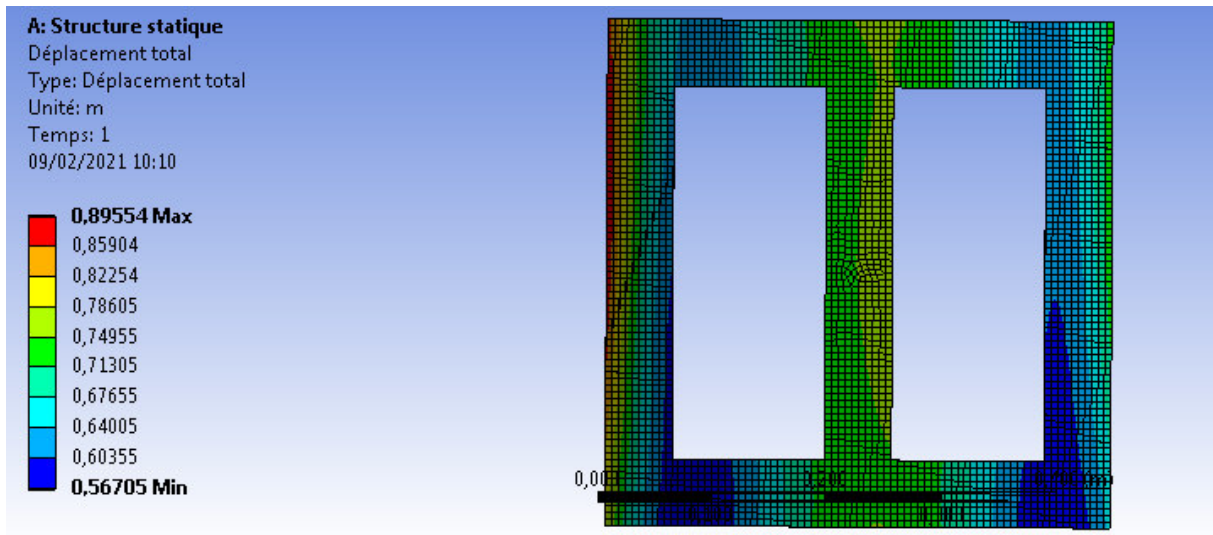


Figure IV.III.08 Amplitude de déplacement de la force de traction 10000N

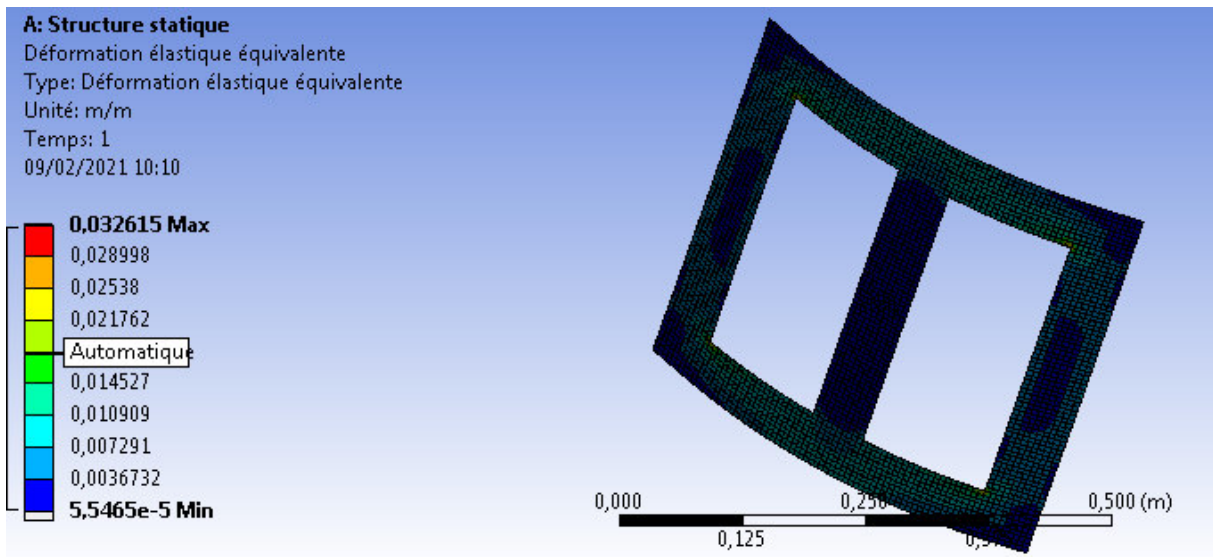
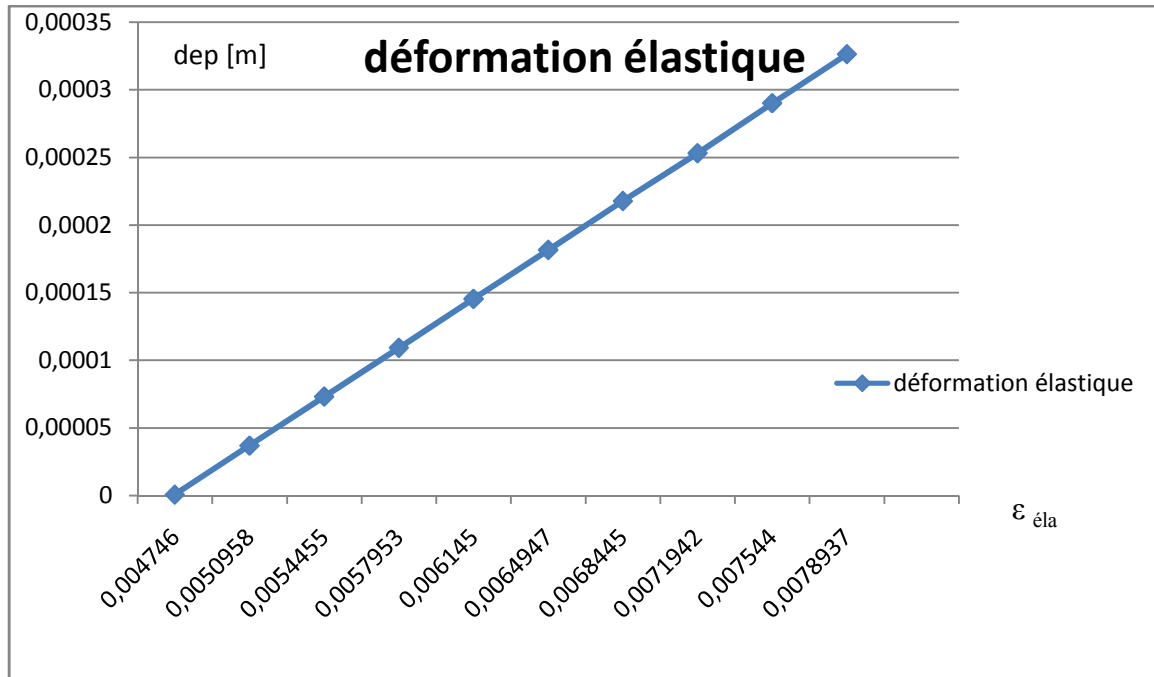
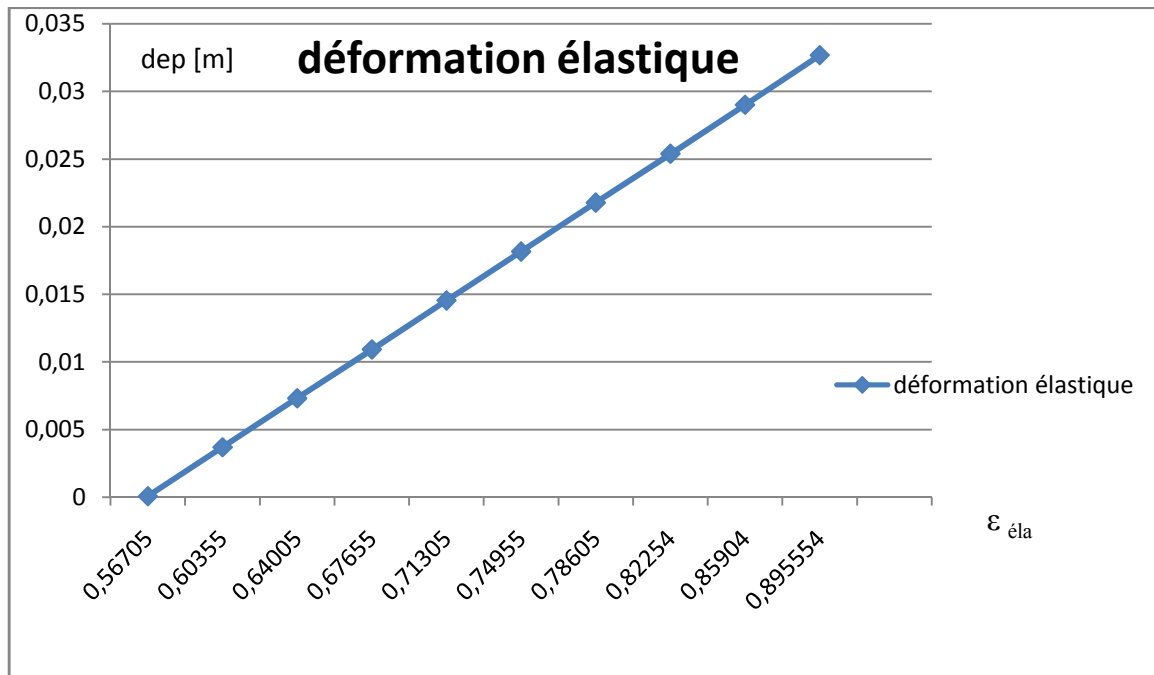


Figure IV.III.09 Déformation élastique équivalente pour f=10000N



FigureIV.III.10 Variation de la déformation élastique pour f = 100N



FigureIV.III.11 Variation de la déformation élastique pour f = 10000N

**➤ Interprétation des figures**

Les figures (IV.III.06, IV.III.07, IV.III.08 et V.III.09) nous renseignent sur l'amplitude des déplacements, de la force de traction et de la répartition de la déformation élastique équivalente, et cela pour deux valeurs différentes de la force 100N et 10000N.

Pour 100N, on remarque que la force se propage au niveau de toute la tôle, ce qui induit ainsi à l'obtention d'une déformation élastique équivalente mais avec de faibles valeurs.

Pour 10000N, une augmentation de l'amplitude de déplacement est observée, ce qui amène à une déformation élastique équivalente accrue.

Les figures (IV.III.10 et IV.III.11) conduisent à conclure qu'il existe une relation proportionnelle entre la force de traction et la déformation élastique équivalente.

**Conclusion**

La tôle magnétique est conçue à base d'alliages ou matériaux ferromagnétiques cristallisés, dans notre cas le Fe-si.

Lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur sur ces matériaux, les moments magnétiques du domaine des cristaux tentent à prendre la direction du champ magnétique appliqué, cette réorientation de l'aimantation provoque la déformation de la tôle magnétique.

Ces déformations sont d'une part nuisibles lorsqu'elles sont considérées comme pertes, d'autre part leur exploitation offrira des avantages telle que l'obtention de convertisseurs d'énergie comme les actionneurs, capteurs, émetteurs récepteurs d'ondes élastiques etc.

On peut conclure que la déformation a deux origines possibles : l'action d'une force ou contrainte extérieure, et les propriétés des matériaux utilisés.

## **Conclusion générale**

L'objectif recherché par le constructeur des transformateurs est de réaliser un appareil performant et sans anomalies.

Le présent travail a été mené dans le but d'élaborer une mesure de détection de défauts possibles dans les tôles magnétiques d'un transformateur. Ce qui servira à améliorer ses capacités et le rendre optimal. Pour se faire, nous avons utilisé des modèles magnétiques et de magnétostriction qui peuvent reproduire assez précisément le comportement magnétique et mécanique des matériaux ferromagnétiques utilisés.

Les modèles magnétiques et de magnétostriction sont appliqués avec succès pour représenter le comportement magnétique et magnétostrictif des matériaux magnétiques utilisés. Les paramètres du module magnétique utilisés sont déterminés à l'aide de l'algorithme de Levenberg Marquardt.

Afin de valider l'amélioration du module de comportement et celui des éléments finis, un ensemble de courbes d'hystérésis expérimentales du Fe-Si à différentes charges a été utilisé pour modéliser le comportement magnéto élastique. Le calcul numérique montre que le modèle amélioré peut mieux décrire le comportement d'hystérésis magnéto-mécanique du Fe Si soumis à une faible ou forte contrainte de compression.

Au cours de notre étude, nous avons constaté que le champ et l'induction magnétique dépendaient des contraintes subies par la culasse, l'équation mathématique de déformation par magnétostriction suit une relation proportionnelle par rapport à l'induction magnétique.

D'après les résultats obtenus sur les courbes des tensions induites du modèle avec défauts, nous avons constaté que les caractéristiques du défaut telles que sa dimension, sa localité et la nature du matériau affecte la structure et la variation des tensions triphasées.

Pour avoir une étude plus précise de la tôle magnétique, nous avons réalisé sous Ansys Mechanical 3D une simulation du couplage magnéto-mécanique, et réalisé un essai de traction, avec lequel nous avons abouti à des résultats numériques des déplacements et des déformations.

Enfin, le stage pratique que nous avons effectué au sein de l'entreprise nationale Electro-Industries, nous a permis d'avoir plus de données et d'informations concernant le monde des transformateurs.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] CHEBLI FARIDA : « Développement de modèles de déformations magnéto-élastiques associés aux matériaux actifs. ».Mémoire de magister en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2016.
- [2] L. EL DJENNADI, N. AZI : « Approches théoriques et pratiques des inductances des transformateurs de l'Electro-Industries.». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2011.
- [3] CHETOUH Samir : « Caractérisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et leur application. ».Mémoire d'ingénieur en génie mécanique. UNIVERSITÉ MENTOURI-CONSTANTINE. Promotion 2010.
- [4] Chrifa OTMANI, Ahmed Bezeid OULD ABDELKADER : « Recherche d'un modèle de comportement magnéto-élastique de vibration et modélisation numérique. Application aux transformateurs de puissance triphasés. ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2016-2017.
- [5] RAKOTOARIMANGA Njoharitsiresy Nambinina : « Rénovation d'un transformateur triphasé au sein de la société pour la maîtrise de l'énergie, de l'eau et de l'environnement. ». Mémoire d'ingénieur d'état en énergies renouvelables. UNIVERSITE D'ANTANANARIVO. Promotion 2018.
- [6] Cours : conception des systèmes électriques(L3). Département d'électrotechnique.2018.
- [7] IGUETOULENE Youcef, OUARAB Mohand Ouahcene : « Gamme d'usinage de la fabrication d'un transformateur de puissance ». Mémoire d'ingénieur d'état en Hydraulique. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Promotion 2008.
- [8] AIT LOUNIS Chafaa, AMZAL Samir : « Dimensionnement et calcul de courant de court circuit d'un transformateur triphasé 100kVA, 30kV/0.4kV. ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2012 /2013.
- [9] Madjid MEZIANI : « Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance. ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2011.
- [10] REKIK BADRI : « Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance. ». Mémoire de magister en électrotechnique. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA. Promotion 2008.
- [11] CHERIF Salma, OULD SLIMANE Djafar : « Modélisation 2-D par éléments-finis des transformateurs de distribution par couplage fort magnétique-circuit électrique et magnétique-

## **BIBLIOGRAPHIE**

densité de courant. ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique. UMMTO. Promotion 2008 /2009.

[12] RATNAJEEVAN; H. HOOL “Finit elements, Electromagnetic and Design”. Elsevier 1995.

[13] H. MOHELLEBI ; “Elaboration de modèles 2D analytico – numériques pour l'étude de systèmes électromagnétiques comportant des pièces en mouvement”. Thèse de doctorat d'état, Université de Tizi-Ouzou. Algérie 2001.

[14] K. SRAIRI; “Modélisation d'actionneurs électromagnétiques alimenté en régime transitoire”. Thèse de doctorat, Université de Nantes 1996.

[15] H. BENS Aidan. “Modélisation des systèmes micro – électromécanique (MEMS) en régime dynamique par la méthode des éléments finis”. Thèse de magistère, Université de Tizi – Ouzou 2006.

[16] K. PREIS, O. BINO “Numerical analysis of 3D magnétostatique field”. IEEE Transaction on magnetic. Vol. 27, No. 5. Spl 1991, P. 3798 – 3803.

[17] G. CHRISTOPHE, M. YRES, M. GERARD. “Numerical aspect of 3D magnetodynamique formation using the magnetic vector potential” L.E.G, ENSIEG. France.

[18] K. KOMEZA, A. PELIKANT, J. TEGOPULOS, S. WIAK “Comparative computation of forces and torques electromagnetic devices by means of different formulae”. Transaction on magnetic. Vol. 30, No. 5 Septembre 1914.

[19] T. YAMAGUCHI, Y. KAWASE and Y. HAYACHI “Investigation of flux density for 3D electromagnetic force calculation using Maxwell stress tensor”. Advanced computational and design techniques in applied electromagnetic systems. 1995.

[20] Z. MAKNI : « Contribution au développement d'un outil d'analyse multiphysique pour la conception et l'optimisation d'actionneurs électromagnétiques ». Thèse de doctorat, l'Université Pars Sud XI, Faculté d'ORSAY, 2006.

[21] N. GALOPIN, K. AZOUM, M. BESBES, F. BOUILLANT, L. DANIEL, O. HUBERT, F. ALVES : « Caractérisation et modélisation des déformations induites par les forces magnétiques et par la magnétostriction ». MGE 2005.

[22] L. DANIEL : « Modélisation multiéchelle du comportement magnétomécanique des matériaux ferromagnétiques texturés ». Thèse de doctorat, Ecole supérieure de Cachan, 2003.

[23] P. BRISSONNEAU : « Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique ». Hermes, 1997.

[24] M. SOULTAN : « Approche du bruit magnétomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion relative ». Thèse de doctorat, l'INSA de Lyon. Décembre 2002.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[25] Ahmed NAIT OUSLIMANE, Hassane MOHELLBI, Quang Anh PHAN. An improved stress-dependent model for magnetomechanical effect simulation of Terfenol-D rods Przegląd Elektrotechniczny. 97 (2021), No. 1,115-120.

[26] O. PERVERTOV, R. SCHÄFER : JOURNAL OF PHYSICS D : APPLIED PHYSICS « influence of applied compressive stress on the hysteresis curves and magnetic domain structure of grain-oriented transverse Fe-3%Si steel ». (2012).

## Résumé

Un transformateur est une machine statique capable de recevoir l'énergie électrique sous une tension et un courant à fréquence donnée, et de la restituer avec une autre tension et un autre courant à la même fréquence.

En effet, le transformateur est un composant fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline.

Vu la diversité du domaine d'application, les constructeurs ne cessent d'améliorer ses performances de fiabilité et de justesse.

Notre travail, s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet des défauts et des charges mécaniques ainsi que la présence d'impuretés dans la tôle magnétique (Fe-Si) des transformateurs de puissance triphasés, afin d'éliminer les défauts et diminuer les pertes d'énergie causés par ces défauts.

L'étude numérique que nous avons effectuée s'agit d'un modèle magnéto-élastique amélioré qui peut mieux décrire le comportement d'hystérésis magnéto-mécanique du Fe Si soumis à différentes contraintes de compression et de traction.

## Liste des tableaux

**Tableau IV-1 : Caractéristiques géométriques du transformateur.**

**Tableau IV-2 : Propriétés électromagnétique.**

**Tableau IV-3 : Propriétés électriques du transformateur.**

**Tableau IV-4 : Valeurs des constantes  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ .**

## Liste des Figures

- Figure I.1 Schéma de principe de la magnétostriction d'un cristal
- Figure I.2 Variations de l'orientation relative des domaines sous l'effet d'un champ polarisant
- Figure I.3 Capteurs magnétostrictifs
- Figure I.4 Schéma de principe d'un actionneur
- Figure I.5 domaines magnétiques
- Figure I.6 courbe de première aimantation
- Figure I.7 Effet des contraintes sur l'aimantation d'un polycristal de fer
- Figure II.1 Transformateur triphasé de puissance [6]
- Figure II.3 Schéma de principe d'un transformateur monophasé [2]
- Figure II.2 Symboles de transformateurs monophasés et triphasés
- Figure II.4 Circuit magnétique [2]
- Figure II.5 Réalisation du circuit magnétique
- Figure II.6 Réalisation des enroulements [8]
- Figure II.7 Transformateur a colonnes [9]
- Figure II.8 Transformateur cuirassé [9]
- Figure II.9 Différents modes de couplage[4]
- Figure III.1 Dispositif électromagnétique comportant l'inducteur, l'induit et l'air
- Figure III.2 Courbe de  $B - H$
- Figure III.3 Calcul de la densité de flux  $B_s$
- Figure III.4 Déformation d'un barreau suivant sa direction longitudinale
- Figure III.5 Déformation d'un barreau suivant sa direction longitudinale
- Figure III.6 Distorsion de la maille cubique dans le fer  $C > a$
- Figure IV.1 Géométrie du transformateur sous l'environnement ANSYS Maxwell 2D
- Figure IV.2 Courbe de  $B = f(H)$
- Figure IV.3 Géométrie du transformateur triphasé
- Figure IV.4 Maillage éléments finis
- Figure IV.5 Valeurs des inductances calculées sous l'environnement ANSYS Maxwell
- Figure IV.6 Allure de la force magnétique suivant OX
- Figure IV.7 Allure de la force magnétique suivant OY
- Figure IV.8 Allure de la force magnétique suivant XY
- Figure IV.9 Répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t= 0.0005s$
- Figure IV.10 Répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t=0.001s$
- Figure IV.11 Répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  à  $t= 0.004s$

## Liste des Figures

- Figure IV.12 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t=0.0025s$
- Figure IV.13 Répartition de l'induction magnétique B à  $t=0.0005s$
- Figure IV.14 Répartition de l'induction magnétique B à  $t=0.001s$
- Figure IV.15 Répartition de l'induction magnétique à  $t=0.004s$
- Figure IV.16 Répartition de l'induction magnétique à  $t=0.00025s$
- Figure IV.17 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.0005s$
- Figure IV.18 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.001s$
- Figure IV.19 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.004s$
- Figure IV.20 Répartition de la densité des forces magnétiques à  $t=0.00025s$
- Figure IV.21 Tension d'aimantation au primaire
- Figure IV.22 Tension induite au secondaire
- Figure IV.23 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_1=0.00225s$
- Figure IV.24 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_2=0.00925s$
- Figure IV.25 Répartition du potentiel vecteur magnétique A à  $t_3=0.0165s$
- Figure IV.26 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_1=0.00225s$
- Figure IV.27 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_2=0.00925s$
- Figure IV.28 Répartition de l'induction magnétique B à  $t_3=0.0165s$
- Figure IV.I. 01 Courbe d'hysteresis du Fe\_Si pour la contrainte de 0MPa
- Figure IV.I.02 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell
- Figure IV.I.03 Distribution de la déformation à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.04 Distribution de la déformation à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.05 Distribution de la déformation à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.06 Distribution de la déformation à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.07 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0025s$ .
- Figure IV.I.08 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.09 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.10 Distribution du Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.11 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$
- Fig12 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.13 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.14 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.15 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.16 Induction magnétique à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.17 Induction magnétique à  $t = 0.0075s$

## Liste des Figures

- Figure IV.I.18 Induction magnétique à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.19 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.20 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.21 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.22 Vecteur densité des forces magnétiques à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.23 Courbe d'hysteresis du Fe\_Si pour la contrainte de -19Mpa
- Figure IV.I.24 Formulation mathématique pour -19 Mpa
- Figure IV.I.25 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.26 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.27 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.28 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.29 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.30 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.31 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0075s$ .
- Figure IV.I.32 Distribution du potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.33 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.34 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.35 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.36 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.37 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.38 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.39 Induction magnétique B à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.40 Induction magnétique B à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.41 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.42 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.43 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.44 Densité des forces magnétiques à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.45 Courbe d'hysteresis du Fe\_Si pour la courbe de -39Mpa
- Figure IV.I.46 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -39 Mpa
- Figure IV.I.47 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.48 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.49 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.50 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$

## Liste des Figures

- Figure IV.I.51 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.52 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.53 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.54 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.55 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.56 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.57 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.58 Potentiel vecteur magnétique A à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.59 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.60 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.61 Induction magnétique B à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.62 Induction magnétique B à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.63 Densité des forces magnétiques F à  $t=0.0025s$
- Figure IV.I.64 Densité des forces magnétiques F à  $t=0.005s$
- Figure IV.I.65 Densité des forces magnétiques F à  $t=0.0075s$
- Figure IV.I.66 Densité des forces magnétiques F à  $t=0.0125s$
- Figure IV.I.67 Courbe de Fe\_Si pour la contrainte -55Mpa
- Figure IV.I.68 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -55 Mpa
- Figure IV.I.69 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.70 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.71 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.72 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.73 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0025s$
- Figure IV.I.74 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.75 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.76 Distribution du champ magnétique H à l'instant  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.77 Induction magnétique B à l'instant  $t=0.0025s$
- Figure IV.I.78 Induction magnétique B à l'instant  $t = 0.005s$
- Figure IV.I.79 Induction magnétique B à l'instant  $t = 0.0075s$
- Figure IV.I.80 Induction magnétique B à l'instant  $t = 0.0125s$
- Figure IV.I.81 Courbe du Fe\_Si pour la courbe de -74MPa
- Figure IV.I.82 Formulation mathématique de la déformation sous maxwell pour -74 MPa.

## Liste des Figures

Figure IV.I.83 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0025s$

Figure IV.I.84 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.005s$

Figure IV.I.85 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0075s$

Figure IV.I.86 Déformation de magnétostriction à  $t = 0.0125s$

Figure IV.I.87 Induction magnétique B à  $t = 0.0025s$

Figure IV.I.88 Induction magnétique B à  $t = 0.005s$

Figure IV.I.89 Induction magnétique B à  $t = 0.0075s$

Figure IV.I.90 Induction magnétique B à  $t = 0.0125s$

Figure IV.I.91 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0025s$

Figure IV.I.92 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.005s$

Figure IV.I.93 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.0075s$

Figure IV.I.94 Distribution du champ magnétique H à  $t = 0.00125s$

Figure IV.I.95 Les courbes d'hystérésis sous différentes contraintes de compression appliquées.

Figure IV.II.01 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t = (T/4)$  s

Figure IV.II.02 Induction magnétique B à  $t = (T/4)$  s.

Figure IV.II.03 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.04 Induction magnétique B à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.05 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.06 Induction magnétique B à  $t = (T/4)$  s

Figure IV.II.07 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.8 Induction magnétique à  $t = (T/4)$  s

Figure IV.II.9 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.10 Induction magnétique B à  $t = (T/4)$  s

Figure IV.II.11 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.12 Induction magnétique B à  $t= (T/4)$  s

Figure IV.II.13 Induction magnétique B à  $t= (T/4)$  s

Figure IV.II.14 Distribution de la déformation de magnétostriction  $\epsilon^{mst}$  à  $t=(T/4)$  s

Figure IV.II.15 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Silicon\_stainless)

Figure IV.II.16 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Silicon\_dioxyde)

Figure IV.II.17 Tension triphasée induite au secondaire dans le cas du (Ferrite)

Figure IV.II.18 La déformation de magnétostriction de la culasse sans défauts sous une contrainte de -74MPa

## **Liste des Figures**

**Figure IV.II.19 La déformation de magnétostriction de la culasse avec défauts sous une contrainte de -19MPa**

**Figure IV.II.20 La déformation de magnétostriction de la culasse avec défauts sous une contrainte de -74MPa**

**Figure IV.III.01 Maillage éléments finis**

**FigureIV.III.02 Amplitude du déplacement de la déformation**

**Figure IV.III.03 Distribution de la tôle sous l'effet de la contrainte**

**FigureIV.III.04 Déformation élastique de la tôle**

**FigureIV.III.05 Allure de la contrainte**

**FigureIV.III.06 Amplitude de déplacement de la force de traction**

**FigureIV.III.07 Déformation élastique équivalente**

**Figure IV.III.08 Amplitude de déplacement de la force de traction 10000N**

**FigureIV.III.09 Déformation élastique équivalente pour  $f=10000N$**

**FigureIV.III.10 Variation de la déformation élastique pour  $f = 100N$**

**FigureIV.III.11 Variation de la déformation élastique pour  $f = 10000N$**