

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل  
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

**Master en Electromécanique**

Option : Electromécanique

## Thème

**Formage de pièces tubulaires par pression électromagnétique:  
Modélisation, simulation et validation**

Par :

**Mr / Kouicem Oussama**

Et

**Mr / Cheriet Oussama**

Travail proposé et dirigé par :

**Dr / Ilhem Hafsaoui**

**Promotion 2021**

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89  
<http://www.univ-jijel.dz>

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers parents, pour leurs sacrifices et leurs efforts consentis, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude ;*

*À mes frères Abdelhamid et Aymen*

*À mes sœurs Aya et Yasmine.*

*À Mes camarades de la promotion : Electromécanique.*

*À la famille du département électromécanique.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*Et bien sûr le meilleur partenaire Oussama qui m'a supporté.*

*KOUICEM Oussama*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents pour leurs patiences, leur soutien et leur encouragement.*

*À ma grand-mère que je souhaite une bonne santé.*

*À mes chers frères*

*À mes chères sœurs.*

*À tous mes proches, mes amis, mes collègues de classe.*

*À toute la famille KOUICEM, plus particulièrement*

*À « OUSSAMA » qui est un cher ami avant d'être mon*

*Binôme et mon collègue.*

*À notre promotrice Mme I.HAFSAOUI.*

*À tous nos profs de la spécialité.*

*Et enfin, à tous ceux qui m'ont aidé dans mon parcours.*

*CHERIET Oussama*

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions DIEU tout puissant, de nous avoir donné la volonté et la patience d'arriver à terme de ce travail.*

*Nous exprimons particulièrement notre reconnaissance à notre cher docteur, Ilhem HAFSAOUI, encadrant de ce mémoire, pour son aide précieuse, ses conseils, sa contribution efficace et ses encouragements qui ont été déterminants pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique pour leur disponibilité, leurs orientations et leur soutien tout au long de notre formation.*

*Pour finir, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail trouvent ici nos remerciements les plus sincères.*

***O. Kouissem***

***O. Cheriet***

# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>I. Formage par pression électromagnétique .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Etat de l'art .....	3
I.3 Définition du magnétoformage.....	5
I.4 Principe du Formage Électromagnétique .....	6
I.5 Eléments constitutifs de l'installation du FEM .....	7
I.5.1 Banc de condensateurs d'impulsion.....	8
I.5.2 Bobines de FEM.....	9
I.5.3 Les caractéristiques nécessaires pour les bobines de FEM .....	12
I.5.4 La matrice.....	13
I.6 Applications du FEM .....	13
I.6.1 Assemblage .....	14
I.6.2 Soudage .....	14
I.6.3 Formage.....	14
I.7 Applications industrielles .....	17
I.7.1 Industrie Automobile.....	17
I.7.2 L'industrie aérospatiale .....	18
I.7.3 Construction de câbles .....	18
I.8 Avantages du processus de FEM :.....	18
I.9 Inconvénients du processus de FEM .....	19
I.10 Conclusion .....	19
<b>II. Modèles mathématiques .....</b>	<b>20</b>
II.1 Introduction.....	20
II.2 Phénomènes électromagnétiques .....	20
II.2.1 Equations de maxwell.....	20
II.2.2 Propriétés macroscopiques de milieux .....	21
II.2.3 Propriétés des matériaux .....	23

II.2.4	Conditions aux limites et aux interfaces .....	24
II.2.5	Formulation en potentiel scalaire électrique $V$ et potentiel vecteur magnétique $A$ .....	25
II.2.6	Modèles électromagnétiques .....	25
II.2.7	Modèle magnétodynamique.....	25
II.2.8	Calculs des grandeurs électromagnétiques .....	26
II.2.8.1	Courant de décharge .....	26
II.2.8.2	Courant induit .....	26
II.2.8.3	Force électromagnétique.....	26
II.2.9	Effet de peau .....	26
II.2.10	Les conditions aux limites .....	27
II.2.11	Equation électromagnétique .....	27
II.3	Phénomène mécanique .....	28
II.3.1	Equation d'équilibre .....	28
II.3.2	Lois de Hooke généralisée.....	28
II.3.3	Relation déformation-déplacement.....	28
II.3.4	Relation contrainte-déformation : .....	29
II.3.5	La symétrie axiale.....	31
II.3.6	Conditions aux limites .....	32
II.4	Couplage magnéto-mécanique.....	32
II.4.1	Couplage faible .....	32
II.4.2	Couplages fort.....	32
II.4.3	Termes de couplage .....	33
II.5	Logiciel de simulation .....	33
II.6	Conclusion .....	34

### **III. Résultats et interprétations ..... 35**

III.1	Introduction.....	35
III.2	Simulation.....	35
III.3	Sélection des matériaux des tubes formés par PEM .....	36
III.4	Inducteurs utilisés dans le formage des tubes .....	36
III.5	Paramètres du processus .....	37

III.6	Expansion 2D libre de tubes par FEM.....	38
III.6.1	Installation d'expansion .....	38
III.6.2	Courant de décharge .....	39
III.6.3	Résultats numériques.....	40
III.7	Compression magnétique libre de tubes .....	43
III.7.1	Modèle géométrique de la compression .....	43
III.7.2	Discussion des résultats.....	43
III.8	Expansion - compression des tubes .....	47
III.8.1	Système expansion-compression.....	47
III.8.2	Analyse des résultats .....	47
III.8.3	Etude paramétrique.....	49
III.8.3.1	Effet des paramètres géométriques.....	49
III.8.3.2	Effet du courant de décharge .....	49
III.8.3.3	Analyse des résultats .....	50
III.8.4	Effet du matériau des tubes .....	61
III.9	Compression de tube avec matrice 2D.....	62
III.9.1	Installation et système simulé.....	62
III.9.2	Résultats de simulation.....	64
III.10	Conclusion.....	70

**Conclusion générale ..... 71**

**Bibliographie ..... 72**

## Listes des Figures

Figure I.1 : Formage et perforation de tube .....	6
Figure I.2 : Schéma représentatif du processus du FEM [16].....	7
Figure I.3 : Banc de condensateurs pour le stockage d'énergie .....	9
Figure I.4 : exemples de bobines utilisées dans le FEM .....	9
Figure I.5 : Bobines d'emboutissage des tôles métalliques .....	10
Figure I.6 : bobines d'expansion de tubes.....	10
Figure I.7 : bobines de Compression de tubes .....	11
Figure I.8 : Bobines selon leur forme.....	12
Figure I.9 : Matrice de FEM .....	13
Figure I.10 : Soudage de tubes .....	14
Figure I.11 : Techniques de FEM (a) : compression (b) : expansion (c) : emboutissage	14
Figure I. 12 : Compression de tubes (1): bobine, (2) : Tube, (3): Tube compressé .....	15
Figure I.13 : L'expansion de tubes (1): bobine, (2) : Tube, (3): Tube expans .....	16
Figure I.14 : formage par placage (1): bobine, (2): Pièce, (3): matrice .....	16
Figure I.15: Pièces assemblées par FEM dans l'industrie d'automobile [9].....	17
Figure I.16 : Câbles construits par impulsion magnétique [16].....	18
Figure III.1: Installation expérimentale [30].....	38
Figure III.2: Modèle géométrique et maillage opté pour ce système.....	39
Figure III.3 : Courant de décharge considéré dans la simulation.....	39
Figure III.4 : Forces magnétiques engendrant l'expansion du tube .....	41
Figure III.5 : Forme finale du tube expansé .....	41
Figure III.6 : Déplacement du centre de tube pendant l'expansion .....	42
Figure III.7: Forme du tube à différents instants de l'expansion .....	42
Figure III.8: Maillage du système de compression simulé .....	43
Figure III.9: Force magnétique au centre du tube lors de la compression .....	44
Figure III.10 : Forme finale du tube compressé.....	44
Figure III.11: Déplacement du centre du tube lors de sa compression .....	45
Figure III.12: Variation de la forme du tube à différents instants de la compression .....	45
Figure III.13: Déformation des tubes lors de la compression et l'expansion.....	46
Figure III. 14 : Modèle géométrique expansion-compression avec maillage adopté .....	47
Figure III. 15 : Formes finales du système expansion-compression .....	48
Figure III. 16 : Evolution du déplacement des centres des tubes.....	48
Figure III. 17 : Formes finales des tubes obtenues par les 3 applications.....	49



Figure III. 18 : Formes des tubes obtenues dans les différents cas étudiés.....	55
Figure III. 19 : Effet du courant de décharge sur le déplacement maximal du tube .....	58
Figure III. 20 : Effet de l'épaisseur du tube sur le déplacement maximal du tube .....	59
Figure III. 23: Système de compression de tube avec matrice.....	63
Figure III. 24: Densité de courant de décharge considéré dans la simulation .....	64
Figure III. 25: Déformation du tube avec différents inducteurs .....	68
Figure III. 26: Déformation du tube avec différentes distances tube-matrice.....	70

## Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés.....	36
Tableau III.2 : Spécifications des inducteurs utilisés dans les simulations .....	37
Tableau III.3 : Différents cas de l'étude paramétrique .....	56
Tableau III. 4 : Différents cas étudiés .....	65

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le formage des métaux consiste à façonner des pièces et des objets métalliques par déformation mécanique ; la pièce est remodelée sans ajout ni retrait de matière et sa masse reste inchangée. Le processus de formage peut être divisé en deux classes principales, à savoir le formage traditionnel et le procédé de formage des métaux à grandes vitesses, qui implique le formage par explosion, le formage électro-hydraulique et le formage par pression électromagnétique, et bien d'autres [1].

Le magnétoformage ou formage électromagnétique (FEM) est un procédé industriel de formage permettant de déformer, de souder ou découper une pièce métallique en utilisant une pression magnétique, le plus souvent du cuivre ou de l'aluminium. La pièce est remodelée par des impulsions magnétiques à haute intensité qui induisent un courant dans la pièce. La pièce peut être modifiée sans contact à partir d'un outil, bien que dans certains cas, la pièce peut être pressée contre une matrice [1].

Le procédé de formage magnétique est une technique de mise en forme à très haute vitesse, appliquée aux métaux, hautement conducteurs (Aluminium, Cuivre, etc.). Cette technique a été utilisée dans plusieurs domaines industriels tels que l'automobile, l'aviation et plusieurs autres industries.

Ce procédé permet de déformer différentes pièces, en particulier celles de forme tubulaire. En effet, les tubes métalliques sont déformés par pression magnétique, en déchargeant un courant intense pulsé à travers une bobine se situant à proximité du tube à déformer. En fonction de la forme et de la position des bobines, des tubes métalliques peuvent être réalisés par compression ou expansion. Ce procédé s'applique principalement aux métaux très bons conducteurs d'électricité puisque la résistivité du matériau doit être la plus faible possible [2].

Le but de ce travail est de développer un modèle numérique capable de simuler la déformation de tubes par formage magnétique, en calculant toutes les grandeurs physiques du système à savoir, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques. Ce modèle numérique, utilise un couplage fort des équations électromagnétiques et celles de la déformation mécanique pour simuler différents systèmes de formage magnétique de pièces tubulaires, en particulier l'expansion et la compression.

Les applications étudiées et simulées sont totalement semblables à celles utilisées industriellement, elles concernent des installations de compression et d'expansion de tubes et

d'autres installations, tout à fait innovantes, permettant de réaliser la compression et l'expansion de deux tubes, de manière simultanée, utilisant le même inducteur. Les résultats obtenus numériquement, sont validés aussi bien théoriquement qu'expérimentalement.

Dans le but de présenter ce travail nous avons divisé ce mémoire en trois chapitres :

Dans un premier chapitre, nous exposons les aspects théoriques et expérimentaux du processus de formage électromagnétique, en détaillant les caractéristiques de ce procédé et ses diverses applications, particulièrement celles trouvées dans l'industrie.

Un deuxième chapitre est consacré aux modèles mathématiques des deux problèmes électromagnétique et mécanique et leur couplage.

Le troisième chapitre présente la simulation de différentes applications et installations industrielles de l'expansion et la compression des tubes par impulsion magnétique à l'aide de modèles numériques éléments finis, développés sous environnement COMSOL Multiphysique. Tous les résultats numériques sont analysés et interprétés.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail et des perspectives proposées.

# Chapitre I

## I. Formage par pression électromagnétique

### I.1 Introduction

Depuis la fin des années 60, la mise en forme à l'aide du champ magnétique pulsé intense, appelée Formage Électromagnétique (FEM) ou encore Magnétoformage, a été employée sur les matériaux à haute conductivité électrique [2] [3].

Ce type de procédé a comme intérêt d'une part de repousser les limites de formabilité obtenues avec un chargement quasi-statique, et d'autre part de réduire la formation de plis et de fortement limiter le retour élastique. Aussi, ce processus permet d'obtenir de nouvelles applications industrielles importantes dans le formage des métaux comme le soudage électromagnétique, l'assemblage et le pliage et la réalisation de pièces complexes. [2][3][4].

Ce chapitre résume l'état de l'art du processus du FEM à savoir les aspects théoriques et industriels.

### I.2 Etat de l'art

Le formage électromagnétique, commencé dans les années 60, comporte un banc de capacités, un inducteur de formage et une pièce électriquement conductrice. Il se base sur la force de Lorentz, qui est une force répulsive causée par des champs magnétiques opposés de conducteurs adjacents. Le banc de capacité délivre une décharge rapide d'énergie qui crée un champ magnétique intense dans la bobine de formage. Ce champ provoque des courants induit, dans la pièce conductrice, qui sont opposés au champ initial. Cela crée une forte répulsion entre l'inducteur et la pièce à former entraînant celle-ci, à se déplacer rapidement loin de la bobine ou se déformer librement ou contre une matrice.

Les premiers jours du formage électromagnétique ont montré une utilisation commerciale limitée par « General Dynamics » [5], « NASA » [6] [7], et « Boeing » [7], qui ont utilisé ce processus pour l'expansion de tube et le formage de composants nécessaires en petite quantité. Récemment, un intérêt remarquable s'est tourné vers ce procédé qui est utilisé de plus en plus dans l'industrie, particulièrement dans l'industrie d'automobile.

Le formage électromagnétique est une technologie de formage par impulsion ou à grande vitesse, qui utilise des champs magnétiques pulsés pour appliquer des forces sur des pièces tubulaires ou en tôle, constituées d'un matériau à haute conductivité électrique. L'application de la force est sans contact et aucun moyen de travail n'est requis. Le principe

est basé sur les effets physiques décrits par Maxwell [8]. Maxwell a expliqué qu'un champ magnétique variant temporairement induit des courants électriques dans les conducteurs à proximité et exerce en outre des forces (les forces dites de Lorentz) sur ces conducteurs. Le premier qui a généré des intensités de champ magnétique suffisantes pour déformer des conducteurs solides était Kapitza [9]. Ainsi, il a fourni la base du processus de formage électromagnétique.

Cependant, les premiers travaux sur l'exploitation technologique de ce principe pour un formage ciblé des métaux ont commencé dans les années 1950 avec le brevet de Harvey et Brower [10]. Une description plus détaillée comprenant des exemples d'applications est donnée dans cette référence [10].

Divers travaux ont été réalisés par de nombreux chercheurs sur le processus de FEM.

Li et al. [11] ont étudié expérimentalement la formabilité d'une plaque d'alliage de titane dans les champs électromagnétiques, en utilisant de l'aluminium comme métal d'entraînement. Ils ont utilisé une batterie de condensateurs d'une capacité de 200 kJ et une bobine en spirale plate de 72 spires. La formabilité de la feuille a été comparée à sa formabilité en utilisant des conditions quasi-statiques et ils ont découvert que la formabilité a augmenté d'environ 24%.

Andersson et Syk [12] ont travaillé sur la formabilité de l'acier au carbone dans les champs électromagnétiques. Leurs expériences ont été menées sur de la tôle d'acier au carbone. Ils ont utilisé une tôle d'acier inoxydable de 0,25 mm et une tôle d'acier au carbone de 0,7 mm. Ils ont utilisé une batterie de condensateurs d'une capacité de 60 kJ. Ils ont effectué des expériences avec et sans l'utilisation de cuivre métallique comme élément conducteur. Ils ont découvert que sans utiliser l'élément conducteur, l'énergie requise pour déformer la feuille de manière électromagnétique est élevée. En outre, ils ont observé une aptitude au formage accrue de la tôle par rapport aux procédés de formage conventionnels.

Li et al. [11] ont mené des expériences afin d'améliorer l'efficacité du processus de FEM en utilisant divers métaux conducteurs pour former une feuille d'alliage de titane.

En outre, une meilleure conductivité et une diminution de l'impédance du métal conducteur améliorent l'efficacité atteinte.

Les pièces de grandes épaisseurs ne peuvent pas être façonnées par FEM conventionnel en raison de la limitation du courant de l'inducteur et de la capacité du banc de condensateurs.

Chang et al. [12] ont étudié le sertissage de tôles en alliage d'aluminium par la méthode EMF. Les résultats ont montré que l'apport d'énergie et la hauteur de la bobine étaient des paramètres significatifs.



Cui et al. [13] ont travaillé sur de nouvelles techniques afin de surmonter ces difficultés, à savoir le formage électromagnétique incrémental.

La simulation du processus de FEM est très importante. Diverses approches de simulation peuvent être appliquées. Bartels et al. [13] ont étudié et comparé deux modèles de simulation pour les champs électromagnétiques à couplage fort et avec couplage faible.

Kim et al. [13] ont étudié l'effet de divers inducteurs sur le FEM de tubes en alliage d'aluminium (AA 3000). La simulation du travail a été réalisée à l'aide de LS-DYNA.

Des travaux expérimentaux ont été effectués pour étudier l'effet de l'entrefer. Les résultats ont montré que l'expansion du tube a augmenté jusqu'à 10 %.

Kleiner et al. [14] ont analysé l'effet de divers paramètres de processus sur diverses techniques de FEM telles que le formage de tubes et le formage de tôles. Les résultats obtenus ont montré que le nombre optimal de spires de bobine, l'écart minimum entre la bobine et la pièce et une décharge d'énergie plus élevée produisent une force maximale entraînant une déformation maximale.

Ce mémoire présente une nouvelle application de formage électromagnétique à double tube utilisant une seule bobine. Un modèle numérique, éléments finis, couplant fortement les phénomènes électromagnétique et mécanique a été établi, sous environnement COMSOL.

Par simulation numérique nous avons abordé aussi bien l'expansion que la compression des tubes. En outre, nous avons analysé les deux procédés simultanément, utilisant un seul inducteur, ainsi que la compression des tubes contre des matrices de formes complexes.

### **I.3 Définition du magnétoformage**

Le magnétoformage est un procédé de mise en forme des métaux à grande vitesse de déformation. Il permet de déformer des pièces métalliques, par des interactions électromagnétiques pures, en déchargeant un courant intense pulsé à travers une bobine se situant à proximité de la pièce à déformer [2].

La figure (I.1) illustre un exemple de formage et de perforation électromagnétique.

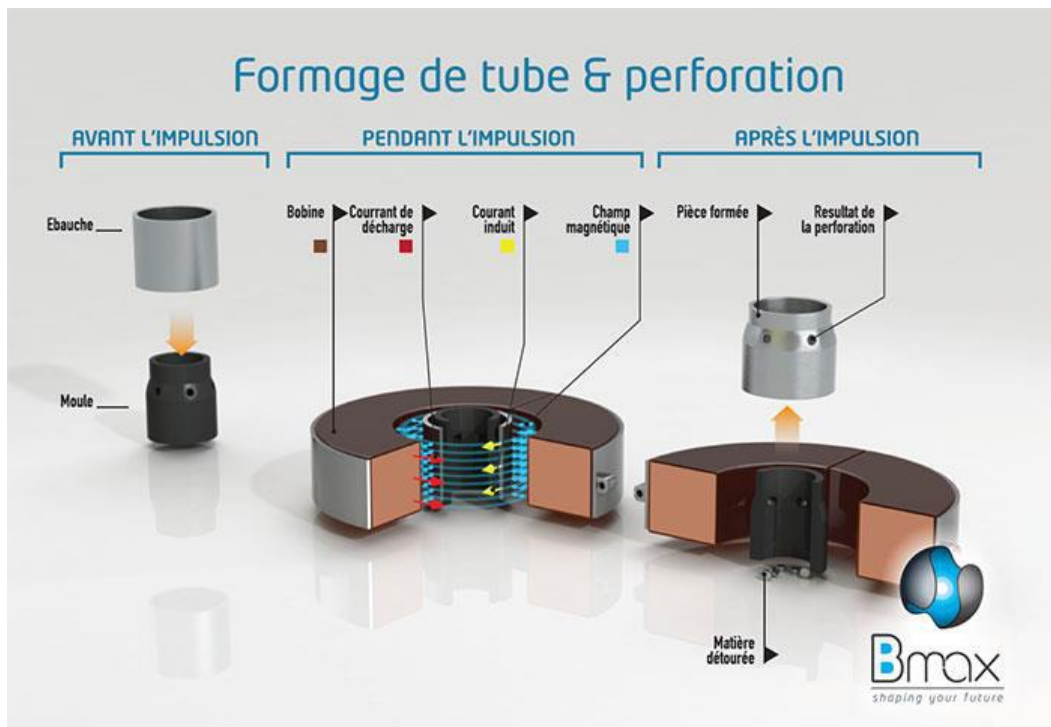


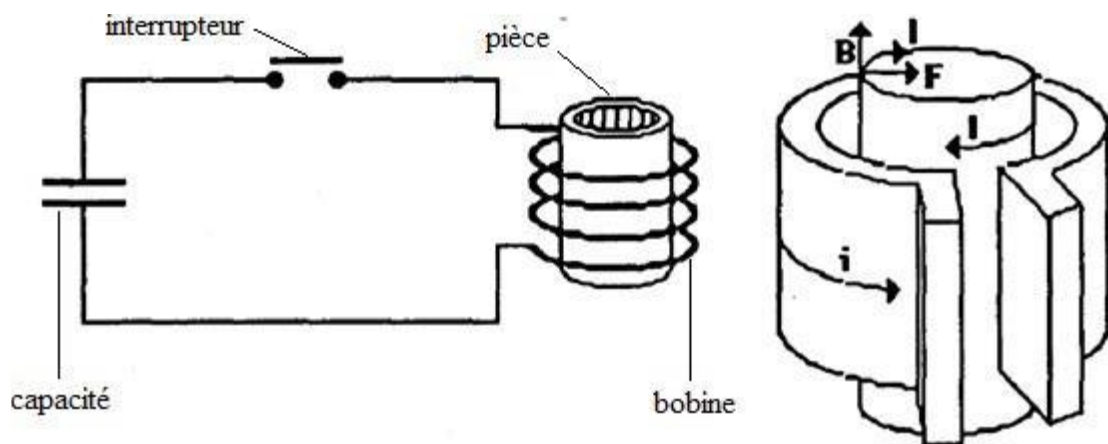
Figure I.1 : Formage et perforation de tube

#### I.4 Principe du Formage Électromagnétique

Les étapes fondamentales du processus de formage électromagnétique sont décrites ci-dessous :

- Stockage d'énergie dans le banc de capacités avec une tension de charge initiale.
- Décharge d'énergie lors du passage du courant dans une bobine à l'aide d'un interrupteur à haute vitesse.
- Un champ magnétique transitoire est produit dans la bobine en raison du courant de décharge.
- Ce champ magnétique pénètre dans la pièce placée à proximité de la bobine.
- Les courants de Foucault sont induits dans la pièce en raison du champ magnétique transitoire de la bobine.
- Ces courants de Foucault limitent la pénétration du champ magnétique de la bobine et créent leur propre champ magnétique induit en sens inverse de celui du champ dans la bobine.
- Le champ magnétique induit ne doit pas se diffuser dans l'épaisseur de la pièce.

- La profondeur à laquelle les effets de l'interaction des deux champs magnétiques sont limités à l'intérieur de la pièce est appelée épaisseur de peau  $\delta$ .
- A l'intérieur de l'épaisseur de peau, les champs magnétiques répulsifs dans la pièce se traduisent par les forces de Lorentz.
- Ces forces produisent une pression magnétique exercée sur la pièce à usiner. Si la pression magnétique est plus élevée que la limite d'élasticité de la pièce, cela provoque la déformation plastique de la pièce.



**Figure I.2 : Schéma représentatif du processus du FEM [16]**

L'efficacité du formage électromagnétique est directement liée à la résistance du matériau de la pièce. Les matériaux avec une faible conductivité ne peuvent être effectivement formés que si une pièce auxiliaire de grande conductivité est utilisée pour pousser la pièce à former [3-4].

L'utilisation du FEM est le plus souvent pour former et assembler de légers composants, des tubes et des plaques métalliques minces.

### **I.5 Éléments constitutifs de l'installation du FEM**

Une installation de magnétoformage est constituée de plusieurs composants :

- un générateur constitué de plusieurs condensateurs, stocke l'énergie électrique et la fournit à la bobine.

- une bobine dont la géométrie dépende de l'opération de formage.
- un circuit de charge du banc de capacité.
- un circuit de décharge.
- un interrupteur du circuit de décharge.
- une pièce conductrice à former. Dans le cas de mauvais conducteurs, il est nécessaire d'ajouter un matériau conducteur entre la pièce et la bobine pour obtenir le formage.
- Une matrice qui donne au matériau la forme désirée.
- Un système de production de vide est généralement nécessaire pour réaliser un bon formage avec matrice. Le vide évite le piégeage de l'air entre la pièce et la matrice et élimine ainsi les défauts de surface.

### **I.5.1 Banc de condensateurs d'impulsion**

La batterie de condensateurs d'impulsion est la partie la plus importante dans un système de FEM, elle est soumise à une tension et à des courants élevés pendant le processus de formage. Sa fonction est de stocker l'énergie électrique provenant de l'alimentation électrique, puis de la décharger très rapidement à travers la bobine de formage [2].

Un générateur est composé d'un circuit de commande qui délivre une tension primaire qui augmente progressivement jusqu'à la valeur désirée. Afin de ne pas surcharger les capacités par une tension secondaire brutale de plusieurs Kilovolts, fournis par le transformateur redresseur, un circuit de contrôle de charge compare en permanence la tension aux bornes des condensateurs à la tension affichée. Lorsque celle-ci est atteinte, le circuit de commande arrête automatiquement la charge et déclenche, soit immédiatement le circuit d'amorçage des interrupteurs rapides provoquant la décharge directement dans la bobine de formage, en fonctionnement automatique sur une chaîne de fabrication, soit dans un circuit de décharge annexe, circuit de sécurité du générateur, permettant un fonctionnement semi-automatique. Dans les deux cas, ce système de sécurité élimine les risques d'accidents électriques.

Le circuit de décharge d'un générateur d'impulsions électriques est du type résonnant, les capacités sont fixées par le constructeur et par conséquent la bobine créatrice du champ que l'on adapte définit la fréquence d'oscillations et le courant dans le circuit.



Figure I.3 : Banc de condensateurs pour le stockage d'énergie

### I.5.2 Bobines de FEM

La conception de la bobine est choisie de manière à transférer un maximum d'énergie stockée dans la pièce placée à proximité. Même si la conception de la bobine peut sembler simple, il existe plusieurs facteurs de complication [2].

En général, la bobine de formage est soumise à la même pression magnétique que la pièce à usiner. La bobine doit résister à des forces magnétiques élevées sans défaillance mécanique. Elle doit également résister à la tension de fonctionnement élevée, au flux magnétique et à l'échauffement.

Un mélange de matériaux est généralement appliqué en utilisant des spires en cuivre, cuivre au Béryllium ou acier inoxydable, enroulées sur un corps alliant une haute résistivité électrique afin de garantir une conductivité électrique élevée et une tenue mécanique excellente.

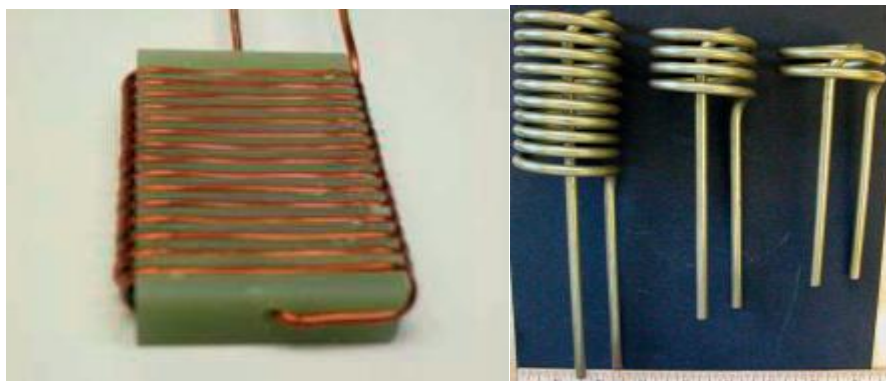


Figure I.4 : exemples de bobines utilisées dans le FEM

Il existe différentes configurations et géométries de la bobine, selon les opérations de formage, elles sont classées comme suit:

- Selon les opérations de formage électromagnétique:
  - Bobine plate utilisée pour l'emboutissage des tôles métalliques.
  - Bobine hélicoïdale utilisée pour l'expansion des tubes.
  - Bobine de compression : Semblable à celle d'expansion, mais entourant le tube à comprimer.



Figure I.5 : Bobines d'emboutissage des tôles métalliques

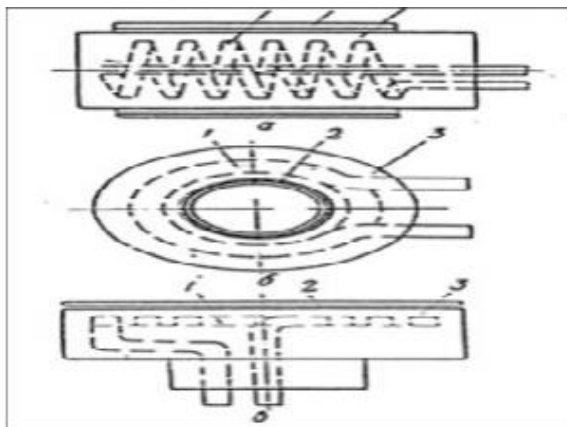


Figure I.6 : bobines d'expansion de tubes

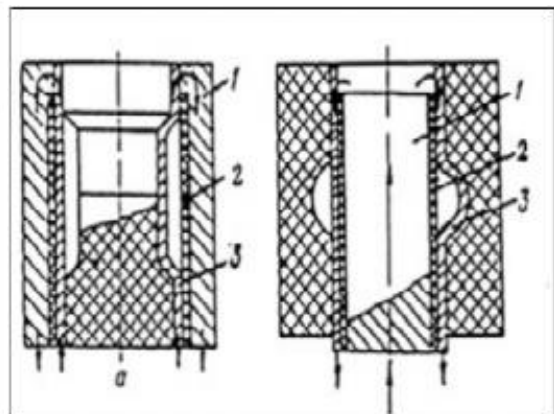


Figure I.7 : bobines de Compression de tubes

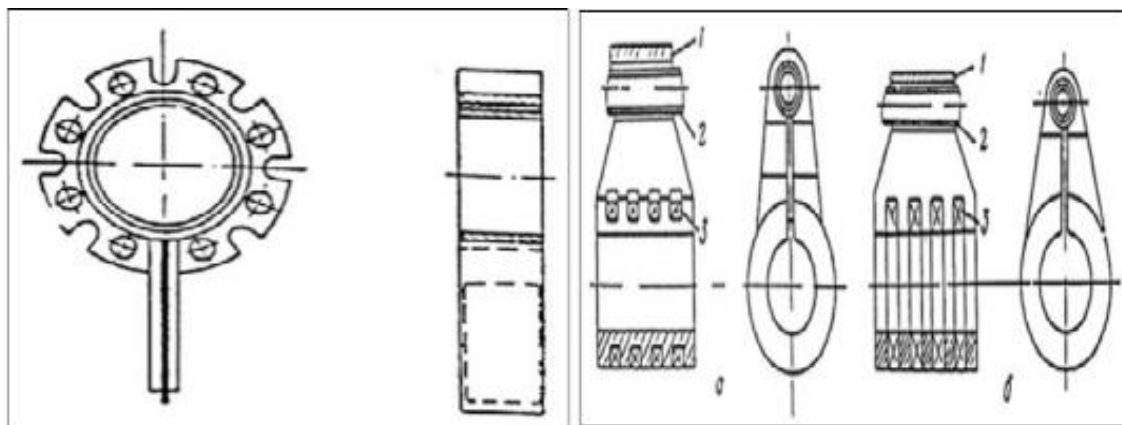
- Selon la construction de la bobine [16] [17] :
  - **Bobine hélicoïdale**: peut-être de toute forme selon l'opération de formage.
  - **Bobine avec concentrateur de champ**: le concentrateur est placé à l'intérieur ou à l'extérieur de la bobine.
  - **Bobine mono spire** : elle est plus simple, elle peut être construite de deux formes : En forme cylindrique pour l'expansion des tubes et la compression des tubes ou en forme plate pour le formage de plaque :
  - **Bobines coaxiales.**
  - **Bobines en boucle.**



a) Bobine hélicoïdale

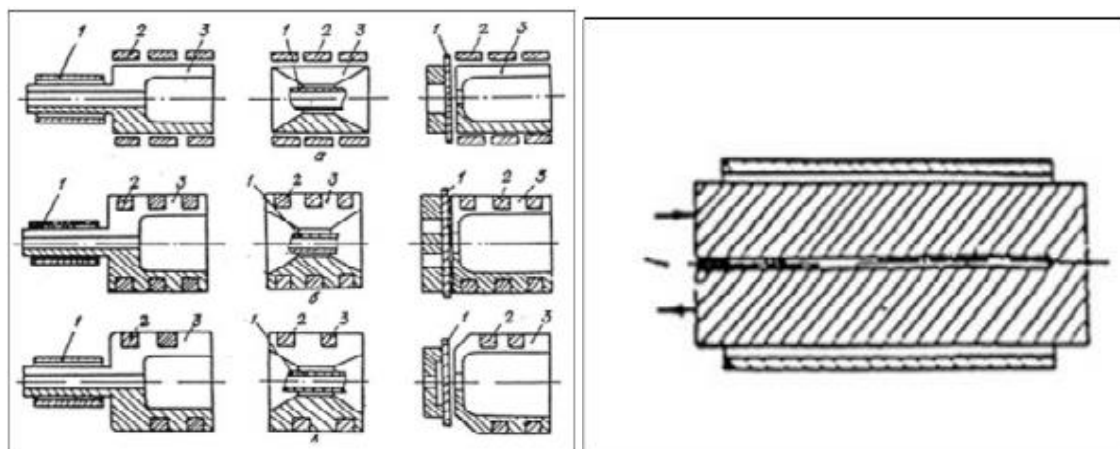


b) Bobines coaxiales



c) Bobines mono spire

d) Inducteur mono spires avec transformateur



e) Bobine avec concentrateur

f) Bobines en boucle

Figure I.8 : Bobines selon leur forme

### I.5.3 Les caractéristiques nécessaires pour les bobines de FEM

Une bobine doit assurer [16][17] :

- Une distribution nécessaire du champ magnétique ou la concentration dans la zone de travail dans la pièce.
- Un grand coefficient de conversion de l'énergie du banc de capacité.
- Une grande résistance mécanique aux forces dynamiques durant le processus de formage.
- Une fréquence optimale du courant de décharge.
- Une connexion efficace aux conducteurs de la machine du FEM
- Une résistance aux surtensions électriques.

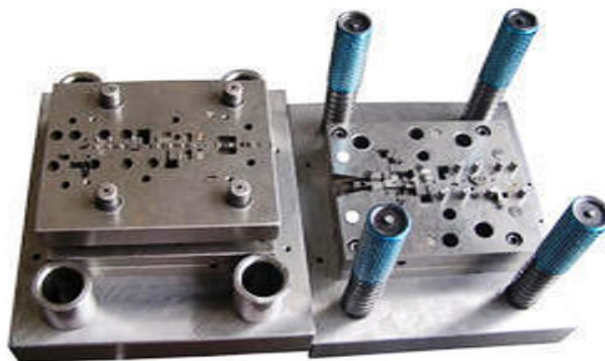


### I.5.4 La matrice

On ne peut pas parler de l'opération de mise en forme sans tenir compte du rôle important que jouent les matrices. Dans certains cas, le champ magnétique ne confère à la pièce qu'une énergie cinétique, la mise en forme est obtenue lors du placage contre la matrice.

Il est nécessaire, du fait de ce placage à grande vitesse, d'utiliser dans la fabrication des matrices des matériaux résistant aux chocs. Ces matériaux doivent avoir une forte résilience (travail aux chocs très important), mais par contre, la résistance mécanique a une importance moindre ; très souvent on utilise l'acier ordinaire et pour de petites séries avec de faibles énergies on a recours à la matière plastique.

Enfin, les grandes vitesses de déplacement atteintes lors du FEM au moment du placage rendent prépondérants les phénomènes d'inertie et l'on peut, pour certaines applications, posant des problèmes de démoulage, employer des matrices en matières souples tel que élastomères ou polyuréthanes, qui se comportent comme un corps rigide face au métal lancé à grande vitesse [18].



**Figure I.9 : Matrice de FEM**

### I.6 Applications du FEM

Les principales opérations du formage par pression magnétique sont classées couramment en trois groupes :

- Assemblage.
- Formage.
- Soudage.

### I.6.1 Assemblage

Au début, le formage magnétique était défini comme un procédé d'assemblage mécanique des pièces tubulaires sur des supports résistants mécaniquement. Nous distinguons:

- L'assemblage par expansion.
- L'assemblage par compression.

### I.6.2 Soudage

Le Magnétoformage, grâce à sa haute vitesse de propulsion, est un procédé qui permet le soudage des matériaux. Généralement, il s'applique sur des pièces de forme tubulaire de petites épaisseurs. Il permet de "souder" des matériaux qui peuvent être similaires ou dissimilaires tels que l'aluminium sur le cuivre, l'aluminium sur l'acier [3] [19].

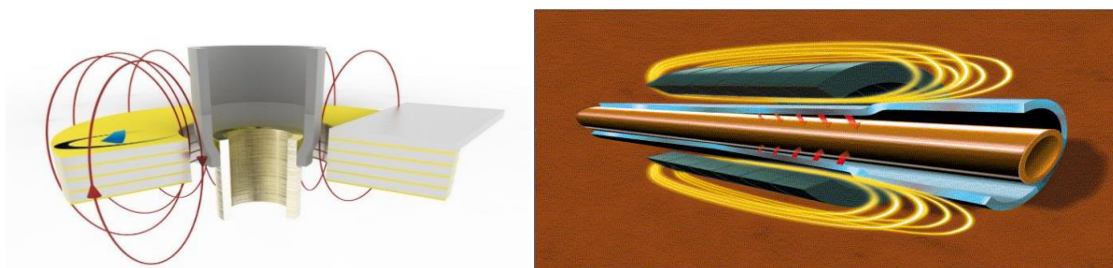


Figure I.10 : Soudage de tubes

### I.6.3 Formage

Dans la technique du formage magnétique, plusieurs applications sont possibles. Les trois opérations essentielles sont [3]:

- La compression
- L'expansion
- L'emboutissage

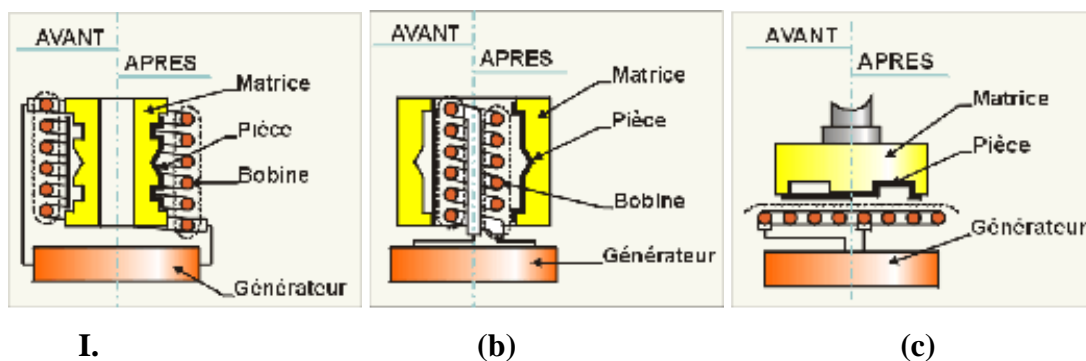
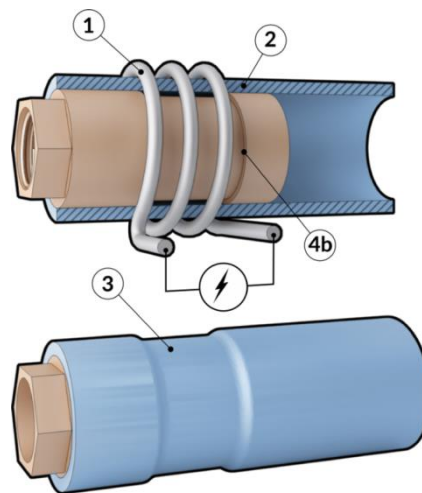


Figure I.11 : Techniques de FEM (a) : compression (b) : expansion (c) : emboutissage

➤ **Mise en forme par compression**

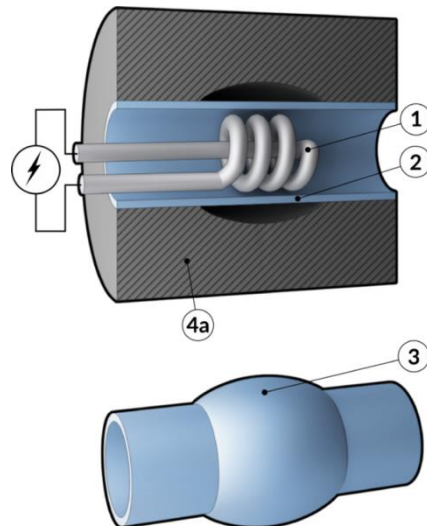
Dans cette configuration, la pièce tubulaire à former, est introduite à l'intérieur d'une bobine, de manière coaxiale. Le tube conducteur est alors le siège d'un courant induit parallèle et de sens opposé au courant inducteur. Le champ magnétique résultant exerce sur le courant induit une force radiale dirigée vers l'intérieur, dépassant largement la limite élastique du métal. Cette technique trouve ses applications plus dans les sertissages et les assemblages que dans les mises en forme. [17]



**Figure I. 12 : Compression de tubes (1): bobine, (2) : Tube, (3): Tube compressé**

➤ **Mise en forme par expansion**

La pièce à déformer est également disposée coaxialement à une bobine du champ mais à l'extérieur de celle-ci. Le champ magnétique créé par la bobine induit un courant dans la pièce, créant des efforts électromagnétiques qui assurent l'expansion de la pièce. L'expansion est essentiellement utilisée pour les opérations de mise en forme des pièces tubulaires. Elle est d'une mise en œuvre plus aisée et donne en général des meilleurs résultats que les opérations de presses classiques. [17]

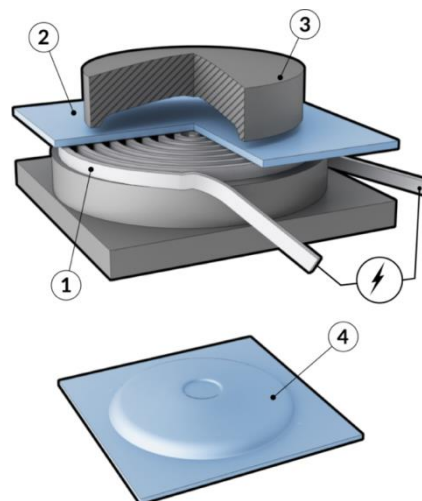


**Figure I.13 : L'expansion de tubes (1): bobine, (2) : Tube, (3): Tube expansé**

➤ **Mise en forme des pièces plates (emboutissage)**

Cette opération consiste à faire passer un courant dans une bobine spirale plate, au-dessus de laquelle est placée une plaque à former (figure I.14).

La décharge dans la bobine induit un courant dans la plaque qui est propulsée perpendiculairement à la bobine. L'utilisation du placage se révèle très intéressante dans les opérations d'emboutissage et permet d'obtenir des pièces à tolérance serrée ou encore ne présentant pas de défauts de surface.[17]



**Figure I.14 : formage par placage (1): bobine, (2): Pièce, (3): matrice**

## I.7 Applications industrielles

A cette époque, l'utilisation de la technologie de FEM est devenue, de plus en plus importante et courante dans plusieurs domaines industriels comme:

### I.7.1 Industrie Automobile

Le développement de l'utilisation des matériaux légers a été identifié comme un levier important pour réduire le poids des véhicules de manière significative et par conséquent, de réduire la consommation des carburants et les émissions de polluants.

En utilisant la force générée par un champ magnétique pour produire les formes souhaitées dans des feuilles de métal conductrices, le FEM a été identifié comme un moyen techniquement réalisable et efficace pour l'expansion ou la compression des cylindres (tubes).

Le principe est fondé sur la déformation plastique du matériau, cette déformation consiste à un allongement ou à un rétrécissement local de la tôle pour obtenir la forme désirée (Fig. I. 15).



Figure I.15: Pièces assemblées par FEM dans l'industrie d'automobile [9]

### I.7.2 L'industrie aérospatiale

L'assemblage par impulsions magnétique a gagné sa place dans cette industrie, par le fait que, lors de l'utilisation de technologies traditionnelles d'assemblage de pièces creuses, leur qualité ne correspond pas aux exigences accrues de la production.

En effet, la navigation aérienne est un art qui exige beaucoup de la part des concepteurs. Désormais, grâce à la technologie de soudage par impulsion magnétique, il est possible de simplifier toutes les étapes de l'ingénierie spatiale. [4]

### I.7.3 Construction de câbles

Il s'agit de câbles de transmission ou pour applications structurelles, les câbles sertis parla technologie magnétique offrent une meilleure résistance à la tension, de meilleures performances et plus d'endurance que les autres.

Le sertissage magnétique produit aussi, des assemblages à plus grande résistance mécanique à surfaces de contact ultra-conductrices et permet d'utiliser de nouveaux matériaux comme le verre, les composites et les fibres optiques [16].



**Figure I.16 : Câbles construits par impulsion magnétique [16]**

### I.8 Avantages du processus de FEM

Le processus de magnétoformage possède plusieurs avantages sur les autres processus classiques de formage. Certains sont communs à tous les processus à hautes vitesses et d'autres sont spécifiques au FEM.

Les avantages les plus importants sont cités ci-dessous :

- Perfectionnement important dans la formabilité.
- Le froissement peut être réduit et même éliminé.
- De très faibles tolérances sont possibles.

- Retour élastique peut être minimisé ou même complètement éliminé.
- Reproduction excellente des détails de surface ainsi ce processus peut être utilisé pour l'emboutissage des surfaces.
  - Tous les avantages précédents peuvent être obtenus à des températures ambiantes sans aucune préparation spéciale du matériau.
  - Le processus est fortement reproductible puisque le courant qui traverse les bobines de formages est la seule variable à contrôler pour un montage donné du FEM. Ceci est contrôlé par la quantité d'énergie déchargée.
  - Importantes économies du coût d'équipements utilisés puisqu'une seule face de matrices et suffisante.
    - Les opérations de formage et assemblage peuvent être combinées en une seule.
    - Puisqu'il n'y a aucun contact mécanique avec la pièce à former, la surface finale ne peut être donnée à la pièce avant le formage.
    - Puisque les forces statiques sont absentes, des structures relativement légères sont souvent suffisantes pour supporter les matrices.
    - De forts taux de production sont possibles, l'étape qui peut contrôler la vitesse de production est le temps nécessaire pour la charge du banc de capacités.
    - C'est un processus "propre" puisqu'aucun lubrifiant n'est nécessaire.

### **I.9 Inconvénients du processus de FEM**

- Seuls les matériaux conducteurs peuvent être formés directement. Si des matériaux non conducteurs doivent être formés, une pièce conductrice doit être utilisée.
- Les considérations de sécurité sont importantes à cause des hautes tensions et courants appliqués.
  - Toutes les géométries de la pièce ne sont pas toutes convenables pour formage électromagnétique, il y a quelques restrictions concernant l'épaisseur et le diamètre des pièces tubulaires.

### **I.10 Conclusion**

A travers ce chapitre, on en déduit que le FEM est un procédé qui suscite un grand intérêt dans quasiment tous les domaines, en particulier celui de l'automobile, le secteur naval, aérospatial et énergétique. Il permet d'accomplir certaines applications qui ont été auparavant impossibles ou beaucoup trop coûteuses avec les méthodes classiques. Par ailleurs, il offre une cadence de production bien plus élevée et rentable que ces autres méthodes.

# Chapitre II



## II. Modèles mathématiques

### II.1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du formage électromagnétique, qui permet une mise en forme des matériaux métalliques à grandes vitesses de déformation. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors de ce processus sont à la fois d'origine électromagnétique et mécanique. L'étude de ces phénomènes physiques nécessite généralement de traduire le comportement physique en terme mathématique appelé modèles mathématiques. La résolution des équations de Maxwell, peut être effectuée avec une méthode d'analyse numérique. La méthode utilisée, et la mieux adaptée aux problèmes électromagnétique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles électromagnétique et mécanique du procédé de FEM illustré précédemment sous forme d'équations mathématiques.

### II.2 Phénomènes électromagnétiques

#### II.2.1 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell qui régissent l'ensemble des phénomènes électromagnétiques font toujours l'objet d'une recherche approfondie en vue de leur résolution. Les observations expérimentales sont exprimées sous forme mathématiques par les équations de maxwell. Ce sont des équations générales valables en toutes circonstances.

Elles ont été établies par J.C Maxwell en 1864 [20] dans le domaine des machines électriques, ces équations étaient intégrées de manière très simplifiée sous forme différentielle.

#### a) Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B} \quad (\text{II.1})$$

L'équation de Maxwell-Faraday (II.1) décrit l'induction d'un courant électrique par variation d'un champ magnétique.

#### b) Maxwell-Ampère

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

L'équation de Maxwell-Ampère (II.2) montre que nous pouvons générer un champ magnétique à partir d'un courant électrique ou par la variation d'un champ électrique

### c) Maxwell-Thomson

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

L'équation de Maxwell-Thomson ou l'équation de flux magnétique (II.3) ressort la continuité de la densité de flux magnétique  $\vec{B}$  dans et hors la matière et ainsi qu'aux interfaces, cette équation démontre en fait l'inexistence de la charge magnétique.

### d) Maxwell-Gauss

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.4})$$

L'équation de Maxwell-Gauss (II.4) relie la densité de flux électrique aux charges électriques.

### e) Equation fondamentale de continuité

$$\operatorname{rot}(\vec{J}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

Parmi les cinq équations précédentes, seulement trois équations sont indépendantes. Un système indépendant peut être formé par les deux premières équations combinées, soit avec la forme électrique de la loi de Gauss ou avec l'équation de continuité [3].

Avec :

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].

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

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

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

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

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

## II.2.2 Propriétés macroscopiques de milieux

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, on rajoute aux équations précédentes les lois constitutives des matériaux ou les lois de comportement des milieux. Celles-ci lient les différents champs magnétiques et électriques

entre eux [21-22]. Pour des matériaux linéaires et isotropes, ces équations sont données généralement sous les formes suivantes :

**a) Caractéristique magnétique**

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

Pour les matériaux magnétiques, si le matériau n'est pas ferromagnétique, le modèle est linéaire de la forme :

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

Dans le cas des matériaux durs (aimant permanents), le phénomène de rémanence est introduit, et on obtient une loi de la forme :

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.8})$$

**b) Caractéristique diélectrique**

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \vec{P} \quad (\text{II.9})$$

Pour le comportement électrique, la relation diélectrique est de la forme :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

**c) Loi d'Ohm**

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$\mu$  : Perméabilité de matériau

$\mu_r$  : Perméabilité relative du milieu

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide

$\mu_a$  : Perméabilité magnétique de l'aimant.

$\varepsilon$  : Permittivité de matériau

$\varepsilon_0$  : Permittivité de vide.

$\varepsilon_r$  : Permittivité de relative.

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

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

$\vec{P}$  : Vecteur de polarisation qui décrit comment le matériau est polarisé en présence d'un champ électrique  $\vec{E}$ .

$\vec{M}$  : Vecteur magnétisation qui décrit comment le matériau est magnétisé en présence d'un Champ magnétique  $\vec{H}$ .

Les équations précédentes décrivent tous les phénomènes électromagnétiques, dans la plupart des cas on ne peut pas les résoudre directement, certains phénomènes deviennent négligeables, alors les équations se découpent, en donnant naissance à des modèles plus simples.

Alors, l'expression de la densité de courant est représentée comme suit :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$\vec{J}_s$ : Densité de courant imposée dans l'inducteur.

$\vec{J}_{ind}$  : Densité de courant induit.

$\sigma\vec{E}$  : Le courant de conduction résultant de champ électrique  $\vec{E}$ .

$\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$  : Le courant résultant du mouvement à la vitesse  $\vec{V}$ .

### II.2.3 Propriétés des matériaux

Les relations constitutives (II.6) (II.9) (II.10) ont été introduites formellement. Ces relations qui semblent être simples peuvent être plus compliquées dans certains cas. Il existe quatre groupes principaux de matériaux.

Le plus compliqué est celui des matériaux inhomogènes ou les paramètres constitutifs varient avec les coordonnées spatiales telles que différentes propriétés de champs peuvent être dans différentes parties de la structure du matériau.

Pour les matériaux anisotropes, les relations en champs sont différentes en tout point pour différentes directions. Cela veut dire qu'un tenseur  $3 \times 3$  est nécessaire pour définir proprement les relations constitutives. Si ce tenseur est symétrique, le matériau est souvent dit réciproque et le système de coordonnées peut être tourné de manière à obtenir une matrice diagonale [23].

La non linéarité est l'effet de variation des propriétés (perméabilité magnétique et permittivité électrique) avec l'intensité du champ électromagnétique. Cela inclue aussi l'effet d'hystérésis, où non seulement les intensités de champ influent sur les propriétés physiques du matériau mais aussi l'historique de la distribution du champ.

Enfin, la dispersion décrit les changements de vitesse d'onde avec la longueur d'onde. Dans le cas du domaine fréquentiel, la dispersion est exprimée par une dépendance des lois constitutives de la fréquence. [3]

### II.2.4 Conditions aux limites et aux interfaces

Chaque deux milieux magnétiques à des propriétés physiques différents sur leur condition du passage d'un milieu à l'autre.

Pour avoir une description complète d'un problème, il est nécessaire de spécifier les conditions aux limites physiques et aux interfaces des matériaux, ces conditions sont traduites par les équations suivantes :

- Condition de la conservation de la composante normale du vecteur d'induction magnétique :

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.14})$$

- Condition de la continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique :

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II.15})$$

- Condition de la continuité de la composante normale de la densité du courant de conduction aux interfaces entre deux milieux de conductivités électriques différentes :

$$(\vec{J}_1 - \vec{J}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.16})$$

- Condition de la discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique :

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.17})$$

- Condition de la discontinuité de la composante normale de l'induction électrique, en présence des charges surfaciques :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \vec{\rho}_s \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$\vec{n}$  : Vecteur unitaire normal à l'interface, dirigé du milieu 1 vers le milieu 2.

### II.2.5 Formulation en potentiel scalaire électrique $V$ et potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$

En se basant sur l'équation de conservation du flux magnétique, on peut définir un potentiel vecteur,  $(\vec{A})$  tel que :

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

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.20})$$

Qui résultent respectivement la loi de Gauss sous sa forme magnétique et la loi de Faraday.

### II.2.6 Modèles électromagnétiques

Les équations qui décrivent le couplage électromagnétique entre l'effet magnétique et les effets électriques peuvent être dans certains cas découplées en donnant naissance à des modèles plus simples.

- Modèle électrostatique.
- Modèle électrocinétique.
- Modèle magnétique scalaire.
- Modèle magnétostatique vectoriel.
- Modèle magnétodynamique.

Dans cette étude, nous utilisons le modèle magnétodynamique.

### II.2.7 Modèle magnétodynamique

Le magnétodynamique consiste à étudier des phénomènes magnétique et électrique en régime dynamique, en négligeant tout fois les courants de déplacement c'est-à-dire sous l'hypothèse de l'électrotechnique. Les champs électromagnétiques sont alors variables par la variation du courant d'excitation

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left[ \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}V = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{div}(\varepsilon \cdot \overrightarrow{\text{grad}}V) + \text{div} \left( \varepsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \rho = 0 \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$\vec{J}_{ex}$  : Courant d'excitation.

## II.2.8 Calculs des grandeurs électromagnétiques

### II.2.8.1 Courant de décharge

Le courant de décharge du banc de capacités dépend des composants du circuit. Il est donné par la formule suivante :

$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi \omega_0 t) \sin(2\pi f t) \quad (a) \quad (II.23)$$

$$\xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (b)$$

Avec :

$\xi$  : Coefficient d'amortissement

$\omega_0$  : Pulsation propre [rad/s]

$V_0$  : Tension du générateur [V]

$C$  : Capacité électrique du circuit de décharge [F].

$L$  : inductance du circuit de décharge [H].

### II.2.8.2 Courant induit

La densité des courants induits est calculée par :

$$\vec{j}_{ind} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (II.24)$$

### II.2.8.3 Force électromagnétique

Le calcul des forces électromagnétiques comporte le calcul des forces volumiques agissant sur les corps et les forces surfaciques résultant des sauts du champ électromagnétique sur les limites.

Dans un système, la distribution des forces électromagnétiques dépend du matériau. Alors, les expressions et les techniques utilisées pour le calcul des forces électromagnétiques se différencient selon les types de matériaux [3] [17].

La méthode la plus utilisée pour calculer les forces dans un dispositif avec un courant induit est celle qui utilise l'expression de Lorentz donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F} = \vec{j}_{ind} \wedge \vec{B} \quad (II.25)$$

## II.2.9 Effet de peau

Dans les basses fréquences, la répartition de la densité du courant dans un conducteur est uniforme, par contre en hautes fréquences le courant a tendance de circuler à la périphérie

du conducteur : ce phénomène est connu sous le nom de l'effet de peau. Il est d'origine électromagnétique et existe dans tous les conducteurs parcourus par un courant alternatif provoquant la décroissance de la densité du courant vers le centre du conducteur. [25]

L'épaisseur de peau, qui est en fonction de la fréquence a pour expression :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$\rho$  : Résistivité de la pièce [ $\Omega.m$ ].

$\omega$  : Pulsation du courant inducteur [rad/s].

### II.2.10 Les conditions aux limites

Dans le problème électromagnétique, les conditions aux limites considérées sont :

- Potentiel magnétique est nul sur l'axe de symétrie ( $r=0$ ).
- Isolation magnétique sur les frontières de la boîte d'air considérée ( $A=0$ ).

### II.2.11 Equation électromagnétique

Les phénomènes électromagnétiques mis en jeu dans le processus du formage magnétique sont régis par le modèle magnétodynamique qui s'applique aux dispositifs électrotechniques dans les sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps.

Les équations mécaniques et les équations électromagnétiques sont alors couplées pour analyser le comportement temporel et spatial des différents composants d'un dispositif de FEM. [22]

En utilisant la formulation en potentiels et en considérant les matériaux isotropes, le système d'équations électromagnétiques à utiliser est le suivant :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) - \sigma \vec{v} \cdot (\overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \cdot \overrightarrow{grad} V = \overrightarrow{J_{ex}} \quad (\text{II.28})$$

En considérant la transformation suivante :

$$\vec{A}^* = \vec{A} + \overrightarrow{grad} V \quad (\text{II.29})$$

Ainsi :



$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} A^* \right) - \sigma \vec{v} \cdot (\overrightarrow{\text{rot}} A^*) = \overrightarrow{Jex} \quad (\text{II.30})$$

### II.3 Phénomène mécanique

Le problème mécanique consiste à déterminer le champ de déplacement  $u$  et/ou des contraintes  $\sigma$  dans un corps de forme initiale connue. Les équations décrivant le comportement du corps sont des équations aux dérivés partielles avec des conditions aux limites. Les caractéristiques d'un milieu isotrope ne changent pas avec la direction autour d'un point à l'intérieur.

#### II.3.1 Equation d'équilibre

L'équation fondamentale régissant la déformation de tous matériaux isotropes est donnée par l'équation d'équilibre appelée en 3D, la seconde loi de Newton :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (\text{II.31})$$

$\rho$  : La masse volumique des matériaux [Kg/m<sup>3</sup>].

$\vec{u}$  : Champ de déplacement (u, v, w) [m].

$\sigma$  : Tenseur de contraintes [Pa].

$F$  : Vecteur de charge [N/m<sup>3</sup>].

#### II.3.2 Lois de Hooke généralisée

Selon la loi de Hooke le tenseur de la contrainte  $\sigma$  est proportionnel au tenseur de la déformation  $\varepsilon$  avec un facteur  $C$  qui est connu sous le nom de module d'élasticité [22] :

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$\varepsilon$  : Tenseur de la déformation.

$C$  : module d'élasticité.

#### II.3.3 Relation déformation-déplacement

Les conditions de déformation en un point, peuvent être complètement décrites par les composantes de la déformation (u,v,w) et leur dérivées. La déformation  $\varepsilon$  peut être décomposée comme suit [3] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (\text{II.33})$$

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$\varepsilon_{el}$  : La déformation élastique.

$\varepsilon_{th}$  : La déformation thermique.

$\varepsilon_p$  : La déformation plastique.

$\alpha$  : Le coefficient d'expansion thermique.

$T$  : Température [K].

$T_{ref}$  : Température ambiante [K].

La déformation thermique est négligeable dans le cas de la modélisation des systèmes de formage magnétique, parce que les variations de température, durant le processeur de **FEM** ne sont pas très excessives.

Les composantes de la déformation sont :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xz} \end{aligned}$$

### II.3.4 Relation contrainte-déformation

La contrainte dans un matériau est décrite par le tenseur symétrique :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\tau_{xy} = \tau_{yz}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz}$$

Pour le comportement mécanique des matériaux non linéaires deux cas existent [26-27] :

- Cas élasto-plastique
- Cas isotrope

**a) Cas élasto-plastique**

La relation contraintes-déformation est donnée par :

$$\sigma = D\varepsilon_{el} + \sigma_0 = D(\varepsilon_{el} - \varepsilon_p - \varepsilon_{th} - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$D = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

E : Le module de Young.

$\nu$  : Le coefficient de poisson.

$\varepsilon_0$  : Contrainte initiale.

**b) Cas isotrope**

Dans ce cas la matrice D est différente :

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Et :

$$\sigma = D_d \begin{bmatrix} \varepsilon x \\ \varepsilon y \\ \varepsilon z \\ \varepsilon xy \\ \varepsilon yz \\ \varepsilon xz \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon x_0 \\ \varepsilon y_0 \\ \varepsilon z_0 \\ \varepsilon xy_0 \\ \varepsilon yz_0 \\ \varepsilon xz_0 \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$D_d = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Ou :

G : le module de la rigidité.

Dans notre travail, nous avons utilisé seulement le cas élasto-plastique.

Le comportement structural du matériau est décrit par la relation constitutive intégrée dans COMSOL, c'est-à-dire le modèle constitutif de Johnson Cook.

### II.3.5 La symétrie axiale

En utilisant dans le cas axisymétrique les coordonnées cylindriques  $r$ ,  $\theta$  et  $z$ , le déplacement dans ce cas est selon la direction  $\theta$ .

On suppose que les composantes de la contrainte  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$  et les composantes de la déformation  $\gamma_{r\theta}$ ,  $\gamma_{\theta z}$  sont nuls. Dans ce cas, on considère que les charges sont seulement dans la direction  $r$  et  $z$  par ce que les charges sont indépendantes de  $\theta$ .

La relation déformation-déplacement dans le cas de symétrie axiale donne :

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}$$

### II.3.6 Conditions aux limites

Dans le problème mécanique, en plus de la condition de symétrie axiale ( $r=0$ ), les conditions aux limites considérées portent sur la pièce à déformer :

➤ **Encastrement**

Dans certains cas, pour éviter la propulsion des pièces à déformer, ces dernières sont encastées au niveau de certaines extrémités. C'est-à-dire que le déplacement de ces extrémités est considéré nul dans toutes les directions.

➤ **Appui plan**

Si dans certains cas, la pièce est en contact avec la matrice, une condition aux limites d'appui plan est considérée, c'est-à-dire que le déplacement est nul selon la direction spécifiée.

## II.4 Couplage magnéto-mécanique

Le comportement du système électromagnétique est régi par l'interaction entre deux phénomènes de natures différentes, l'étude des systèmes de magnétoformage nécessite l'analyse électromagnétique et mécanique, pour cela, il est nécessaire de coupler les équations électromagnétiques avec celles régissant la déformation mécanique [28]. Alors, le couplage peut être faible ou fort :

### II.4.1 Couplage faible

Le processus de résolution d'un problème de magnétoformage avec la méthode de couplage faible dépend du résultat calculé de l'équation électromagnétique à chaque pas du temps.

Ensuite, les forces magnétiques calculées sont les termes sources de l'équation mécanique qui est résolue par les éléments finis pour permettre le calcul de la déformation.

Alors, ce processus itératif est répété à chaque étape du calcul.

### II.4.2 Couplages fort

Ce couplage fort nécessite la résolution globale des équations électromagnétique et mécanique à chaque pas de temps et de la manière transitoire. Donc, la précision de la

solution est améliorée, il nous donne des résultats plus proches de la réalité. L'avantage du couplage fort est que nous pouvons l'utiliser dans le cas des problèmes fortement couplés, par contre son inconvénient est la manipulation des larges matrices et par conséquent la demande de plus d'espace mémoire. Ainsi, la géométrie est remaillée à chaque pas de temps. C'est le type du couplage utilisé dans ce travail, puisque le logiciel COMSOL le permet.

### II.4.3 Termes de couplage

Dans le couplage électromagnétique-mécanique ce terme est représenté par la force magnétique  $\vec{F}$  qui est exploitée au niveau de la pièce :

$$\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.41})$$

## II.5 Logiciel de simulation

Le logiciel COMSOL multi-physique est un logiciel très développé, qui utilise la méthode des éléments finis permettant d'élaborer différents modèles et analyser différents phénomènes physiques et permet de générer un maillage automatique et analyser les résultats en offrant différentes possibilités pour tracer différentes courbes des grandeurs calculées.

Le choix du logiciel COMSOL est pertinent du fait qu'il est reconnu comme robuste pour ses calculs, qu'il soit de plus en plus utilisé dans l'industrie et que la littérature témoigne que des équipes de recherche travaillent à l'aide de ce logiciel pour simuler plusieurs processus multi physiques mettant en jeu différents phénomènes de natures différentes [29].

Les étapes à suivre pour simuler et résoudre les problèmes de formage magnétique à l'aide des applications COMSOL :

- Choix du mode de résolution 2D axisymétrique.
- Choix de module d'application (dans notre cas on utilise AC/DC, mécanique des structures)
- Choix des équations à résoudre (équation électromagnétique, équation mécanique)
- Choix du régime de résolution (dans notre cas on utilise temporel)
- Construction du domaine d'étude (géométrie du système étudié).
- Introduction des propriétés physiques liées à chaque milieu.
- Introduction des conditions aux limites pour chaque milieu.
- Choix du maillage du domaine d'étude.

- Résolution du système couplé.
- Post traitement et exploitation des résultats.

Tous les résultats obtenus, présentés dans le chapitre suivant, ont été obtenus grâce au logiciel COMSOL version 3.5.

## **II.6 Conclusion**

Dans cette partie, nous avons décrit mathématiquement les phénomènes physiques (électromagnétiques et mécaniques) mis en jeu dans le FEM, par des équations mathématiques.

Après avoir examiné les bases théoriques du FEM, nous allons présenter dans la partie suivante, les résultats numériques obtenus par simulation de certaines applications industrielles, en utilisant le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

# Chapitre III



## III. Résultats et interprétations

### III.1 Introduction

La modélisation du magnétoformage nécessite de résoudre un problème multi-physique faisant intervenir simultanément un problème électromagnétique, un problème de mécanique des solides déformables. Ceux-ci sont étroitement couplés

Dans ce dernier chapitre, nous présentons toutes les applications de formage de pièces tubulaires, en utilisant comme il a été déjà mentionné dans le chapitre précédent, le logiciel COMSOL, basé sur la méthode des éléments finis. C'est un outil très développé et bien adapté aux problèmes multi-physiques car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation éléments finis, soit : la définition de la géométrie et des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux limites, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats.

L'objectif principal de nos simulations est le calcul des courants induits et les forces de Lorentz, que subissent les tubes déformés par pression électromagnétique (PEM), ainsi que les profils des tubes une fois déformés.

### III.2 Simulation

La simulation du formage de tubes par pression magnétique, en particulier l'expansion et la compression des pièces tubulaires peut se résumer dans les étapes suivantes :

La première étape consiste à définir la géométrie bidimensionnelle des installations de formage magnétique de tubes.

La deuxième étape porte sur la définition des propriétés physiques, électriques et mécaniques des différents matériaux utilisés. Cela consiste à définir, en plus de la densité, les conductivités électriques, les permittivités magnétiques ainsi que le module de Young et le coefficient de Poisson.

Ensuite, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel nul imposé au niveau de la boîte d'air, considérée de dimensions assez grandes et le déplacement nul aux niveaux des frontières de tubes qui sont encastrées.

Le mailleur automatique de COMSOL fournit un maillage bien adapté au problème simulé et permet à l'utilisateur de l'affiner pour gagner dans la précision de la solution numérique.

L'étape suivante est consacrée à la résolution du problème couplé, électromagnétique-mécanique.

La dernière étape consiste à l'affichage des résultats, en donnant les répartitions spatiales et temporelles de toutes les grandeurs électriques et mécaniques de notre simulation.

### III.3 Sélection des matériaux des tubes formés par PEM

Le processus du FEM est utilisé pour déformer des pièces de matériaux électriquement conducteurs. Lors de la recherche bibliographique, nous avons remarqué que les matériaux les plus utilisés avec ce procédé sont l'Aluminium et ses alliages, cuivre et ses alliages, Acier, Titanium et ses alliages, Magnésium et ses alliages, etc...

Donc, nous avons décidé d'utiliser, dans notre simulation, l'Aluminium et ses alliages, vu que sa conductivité et sa formabilité sont importantes. Pour une étude comparative, nous avons choisis de comparer l'Aluminium avec d'autres matériaux comme le Magnésium et l'acier. Pour tous les inducteurs, le matériau considéré est le cuivre.

Les propriétés physiques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés**

	<b>Aluminium</b>	<b>Aluminium 3303-H18</b>	<b>Magnésium AZ31B</b>	<b>Acier AISI 4340</b>	<b>Cuivre</b>
<b>Densité [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2700	2700	1770	7850	8700
<b>Conductivité électrique[S/ m]</b>	$3.774.10^7$	$2.326. 10^7$	$1.087. 10^7$	$4.032. 10^6$	$5.998.10^7$
<b>Module de Young [Pa]</b>	$70 .10^9$	$70.10^9$	$45. 10^9$	$205.10^9$	$110.10^9$
<b>Coefficient de poisson</b>	0.33	0.33	0.35	0.28	0.35

### III.4 Inducteurs utilisés dans le formage des tubes

L'inducteur est l'élément critique, qui contribue fortement, lors du processus de formage par pression électromagnétique. En effet, c'est le composant qui est responsable de la

création des forces électromagnétiques, des pressions magnétiques et des déformations mécaniques.

Dans notre travail, les inducteurs considérés dans les différentes simulations sont massifs, non solénoïdes, semblables à ceux utilisés expérimentalement [30-31], dont les spécifications géométriques sont indiquées dans le tableau III.2.

**Tableau III.2 : Spécifications des inducteurs utilisés dans les simulations**

	<b>Inducteur 1</b>	<b>Inducteur 2</b>	<b>Inducteur 3</b>	<b>Inducteur 4</b>	<b>Inducteur 5</b>	<b>Inducteur 6</b>	<b>Inducteur 7</b>
<b>Longueur [mm]</b>	80	30	20	10	5	2.5	1
<b>Diamètre intérieur [mm]</b>	81	50	50	50	50	50	50
<b>Epaisseur [mm]</b>	2	5	5	5	5	2.5	1

### III.5 Paramètres du processus

Dans le formage par pression magnétique, il existe différents paramètres physiques, affectant la formabilité des pièces tubulaires :

- L'énergie de décharge (Le courant de décharge).
- Dimensions de l'inducteur.
- Entrefer (distance entre le tube et l'inducteur).
- Dimensions des tubes (particulièrement l'épaisseur des tubes)
- Matériau des tubes.

En se basant sur la bibliographie, les paramètres major qui affectent la déformation des tubes sous pression électromagnétique, à savoir, l'énergie, l'entrefer, l'épaisseur des tubes et leurs matériaux ont été sélectionnés dans l'étude paramétrique.

### III.6 Expansion 2D libre de tubes par FEM

#### III.6.1 Installation d'expansion

Comme première application de formage de tubes, nous avons simulé le système d'expansion, qui se rapproche de celui de la référence [30], comportant, en plus de l'inducteur, un tube de longueur 150 mm, de diamètre intérieur 87mm et d'épaisseur 1mm, est expansé sous pression magnétique. La figure III.1 montre l'installation expérimentale [30], qui a été simulé par le code éléments finis COMSOL MULTIPHYSICS. Ce dernier ne considère que la moitié de la géométrie, puisque le système est axisymétrique. De plus, le mailleur automatique du logiciel permet de choisir un maillage convenable au problème étudié, comprenant 6801 nœuds et 13504 éléments et- donc 31495 degrés de liberté (Figure III.2).

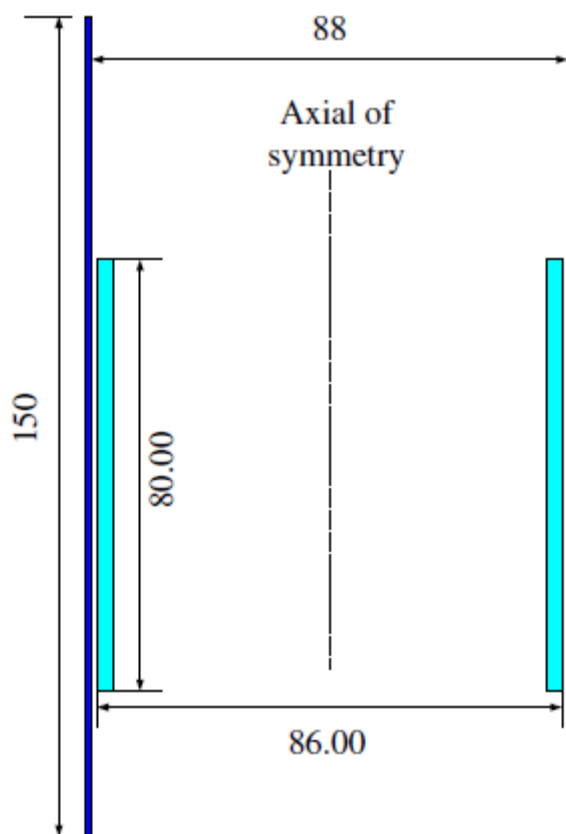
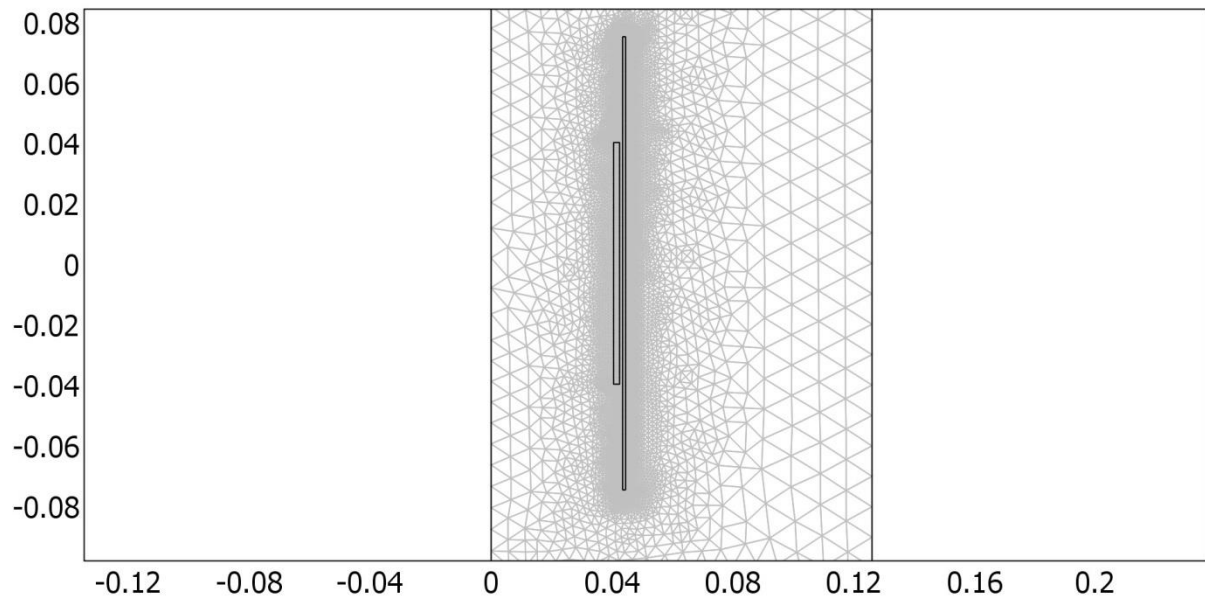


Figure III.1: Installation expérimentale [30]

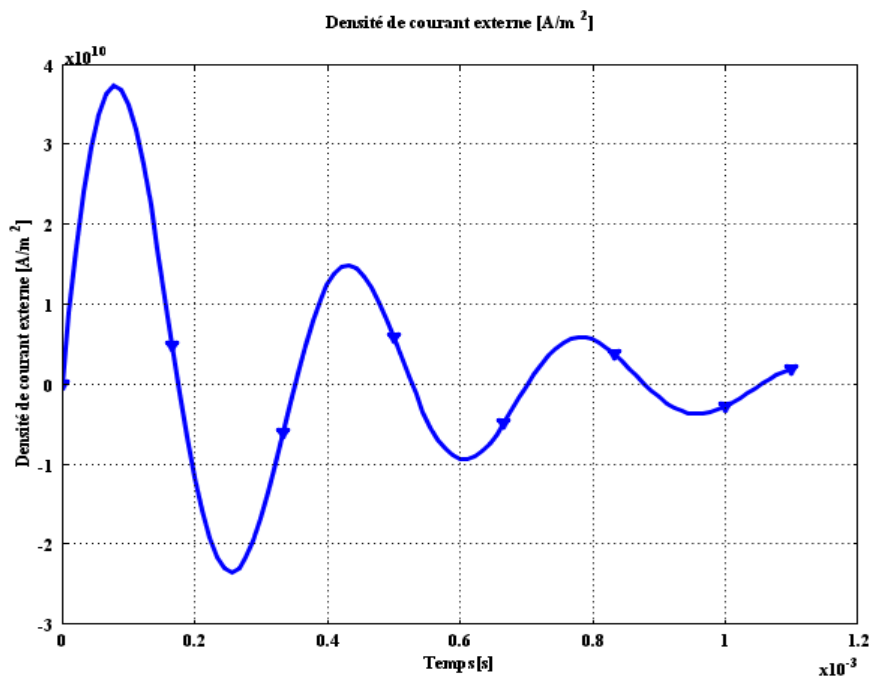


**Figure III.2: Modèle géométrique et maillage opté pour ce système**

### III.6.2 Courant de décharge

Utilisant l'inducteur 1 (Tableau III.2), le courant de décharge (III.1), considéré dans la simulation, est proche de celui utilisé expérimentalement par [30] (Figure III.3).

$$J_{\varphi} = 4.648e10 * \exp(-2621.7 * t) * \sin(17888 * t) \quad (III.1)$$



**Figure III.3 : Courant de décharge considéré dans la simulation**

### III.6.3 Résultats numériques

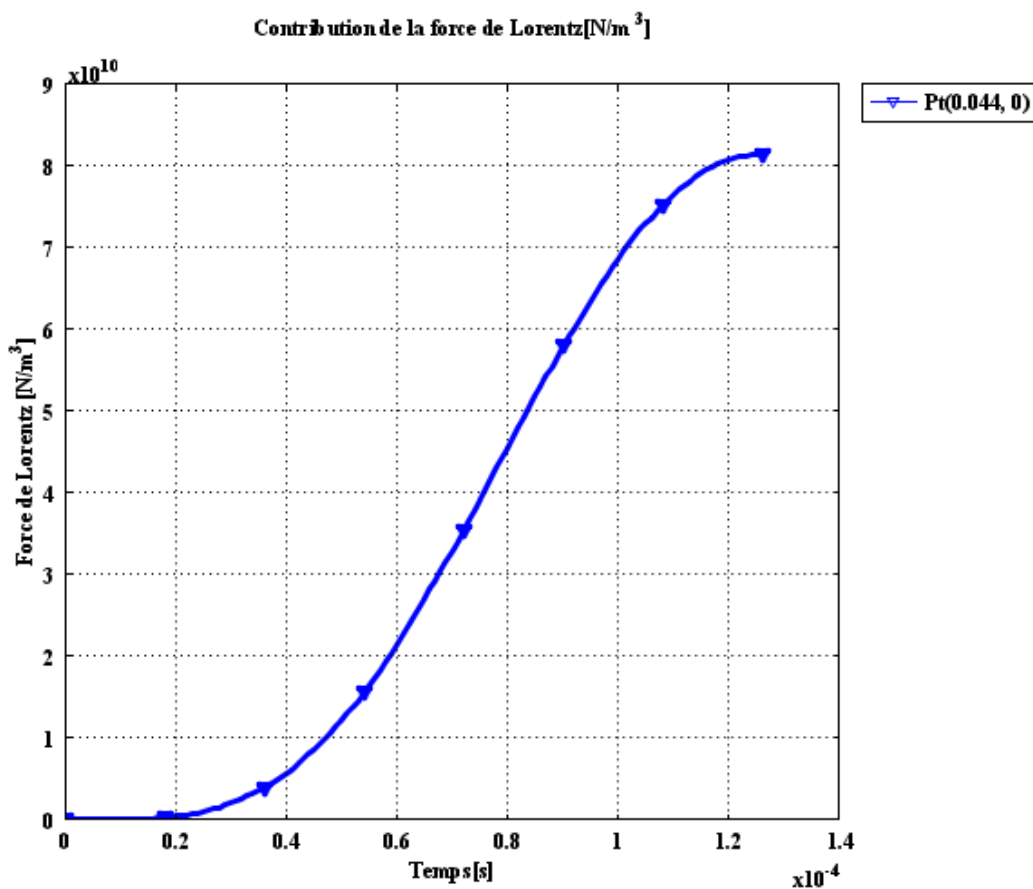
La pression magnétique appliquée grâce au courant de décharge impulsionnel peut être représentée par d'importantes forces de Lorentz (Figure III.4), créées au niveau du tube et engendrant l'expansion plastique de ce dernier.

Ces forces et pressions magnétiques sont surtout concentrées dans la partie du tube, en face de l'inducteur, où règnent le champ magnétique et les courants induits. Ce ci explique la forme finale du tube expansé, obtenue à l'instant  $t=126\mu\text{s}$ .

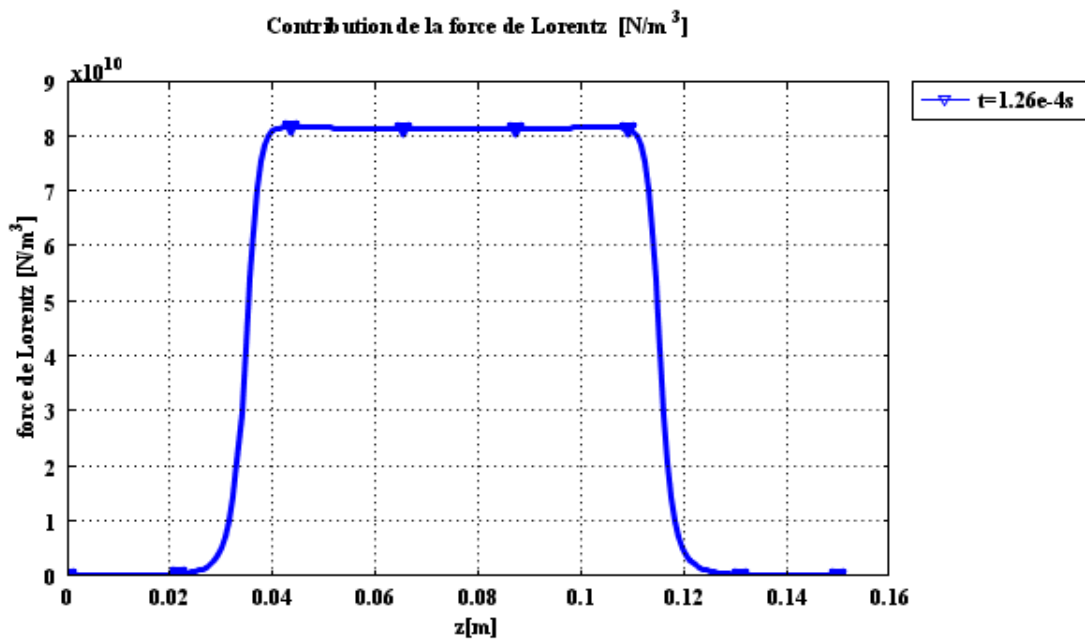
Ainsi, la forme obtenue pour l'expansion de tubes par pression magnétique est bien prévisible théoriquement (Figure III.5).

D'autre part, les résultats numériques permettent de conclure que la vitesse de l'expansion du tube est faible aux premiers instants puis la déformation du tube s'accélère rapidement, jusqu'à atteindre le profil final (Figures III. 6-7).

Ces résultats numériques sont en bonne concordance qualitative avec ceux des travaux expérimentaux [30-31].



(a) : Variation en fonction du temps des forces de Lorentz au centre du tube



(b) : Forces magnétiques le long du tube à l'instant final de l'expansion

Figure III.4 : Forces magnétiques engendrant l'expansion du tube

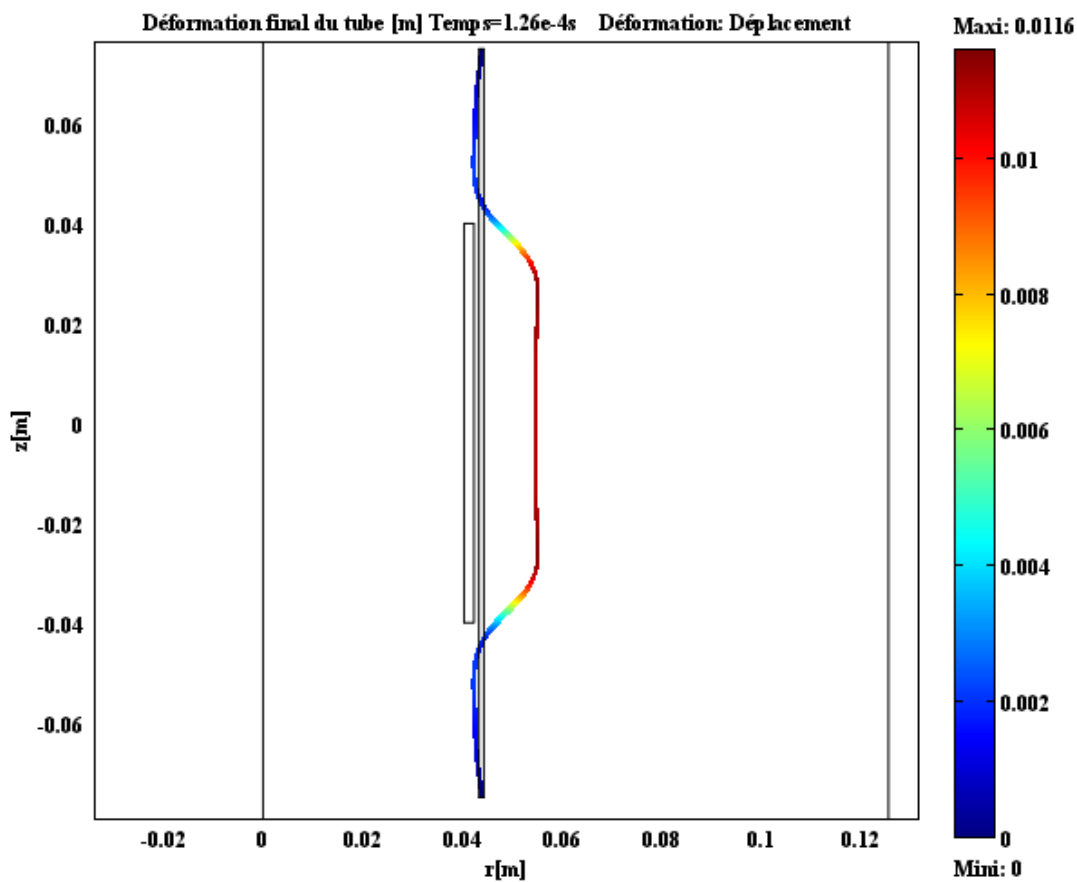


Figure III.5 : Forme finale du tube expansé

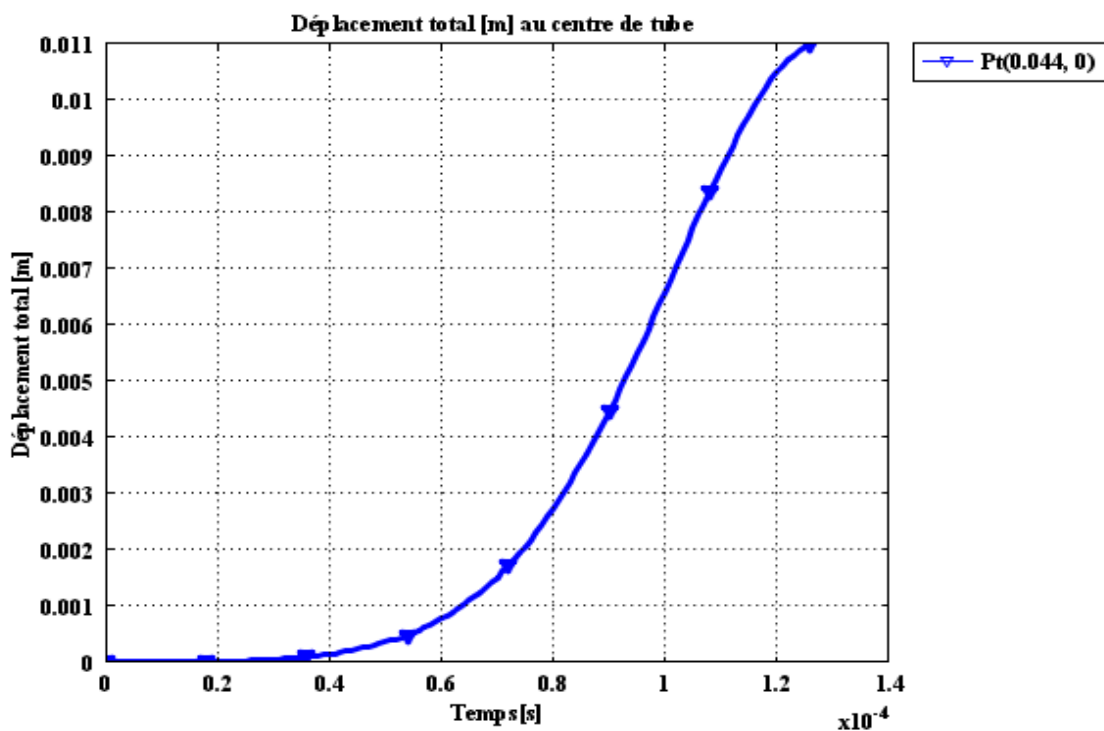


Figure III.6 : Déplacement du centre de tube pendant l'expansion

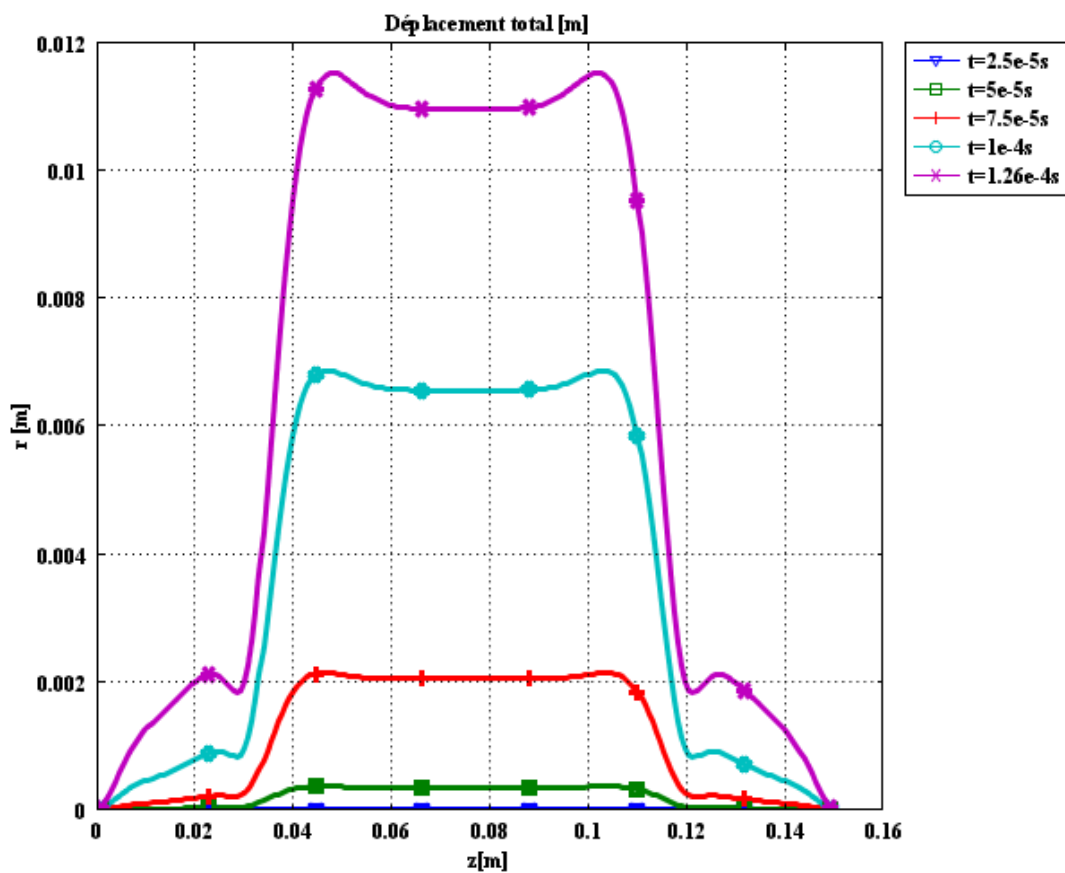


Figure III.7: Forme du tube à différents instants de l'expansion

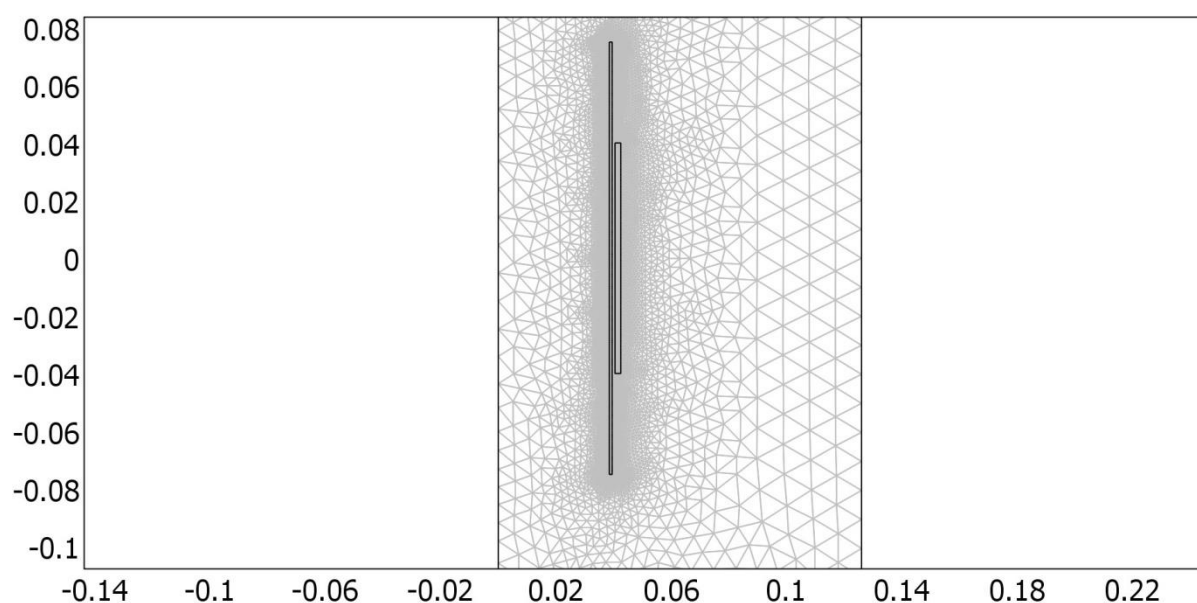


### III.7 Compression magnétique libre de tubes

#### III.7.1 Modèle géométrique de la compression

Dans la deuxième application, le tube (150 mm x 77 mm x 1mm) est introduit à l'intérieur de l'inducteur 1 (Tableau III.2), pour être comprimé magnétiquement, avec le même courant précédent.

Le maillage éléments finis, fournit par Comsol (Figure III.8), comporte 13112 éléments, 6605 nœuds et 30711 degrés de liberté.



**Figure III.8: Maillage du système de compression simulé**

#### III.7.2 Discussion des résultats

Bien que les forces de Lorentz (Figures III.4 et III.9) sont plus importantes dans le cas de la compression, cependant la déformation est légèrement plus accentuée sur le tube ayant été expansé (Figures III.5-7) que celui comprimé (Figures III.10-12).

En effet, en comparant les deux profils finaux ( $t=126\mu\text{s}$ ) des deux tubes expansé et comprimé (Figure III.13), ces derniers sont presque semblables (pratiquement symétriques) avec une légère différence au niveau des bords où le déplacement est maximal (effet de bord).

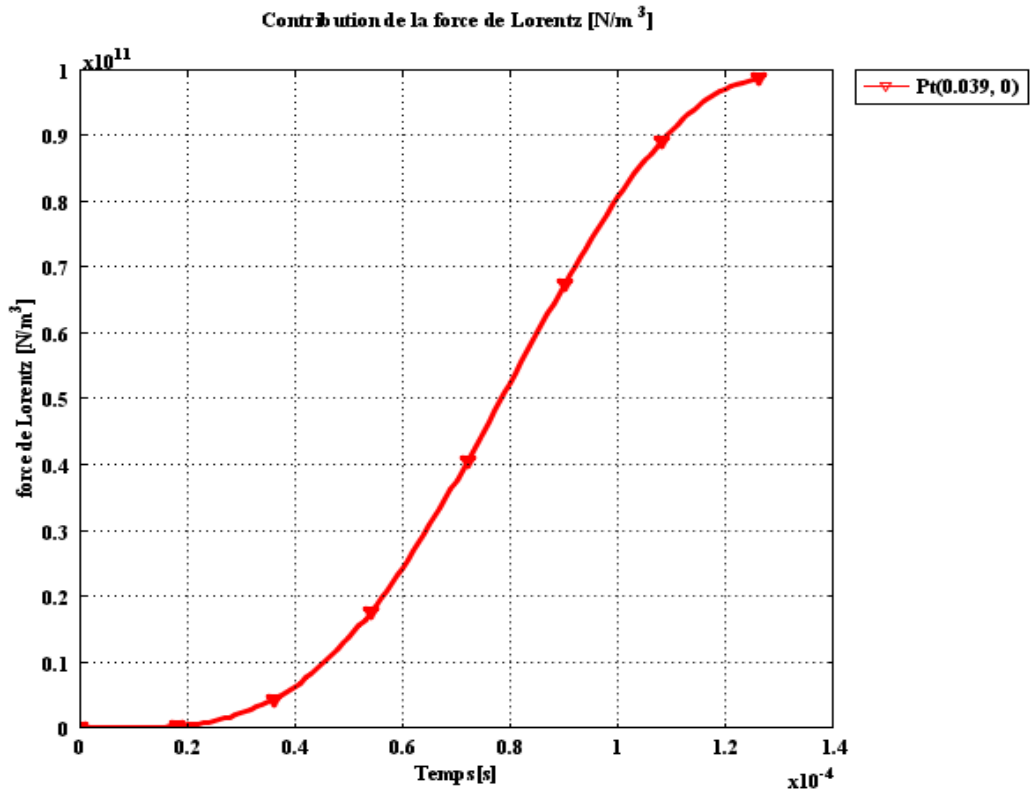


Figure III.9: Force magnétique au centre du tube lors de la compression

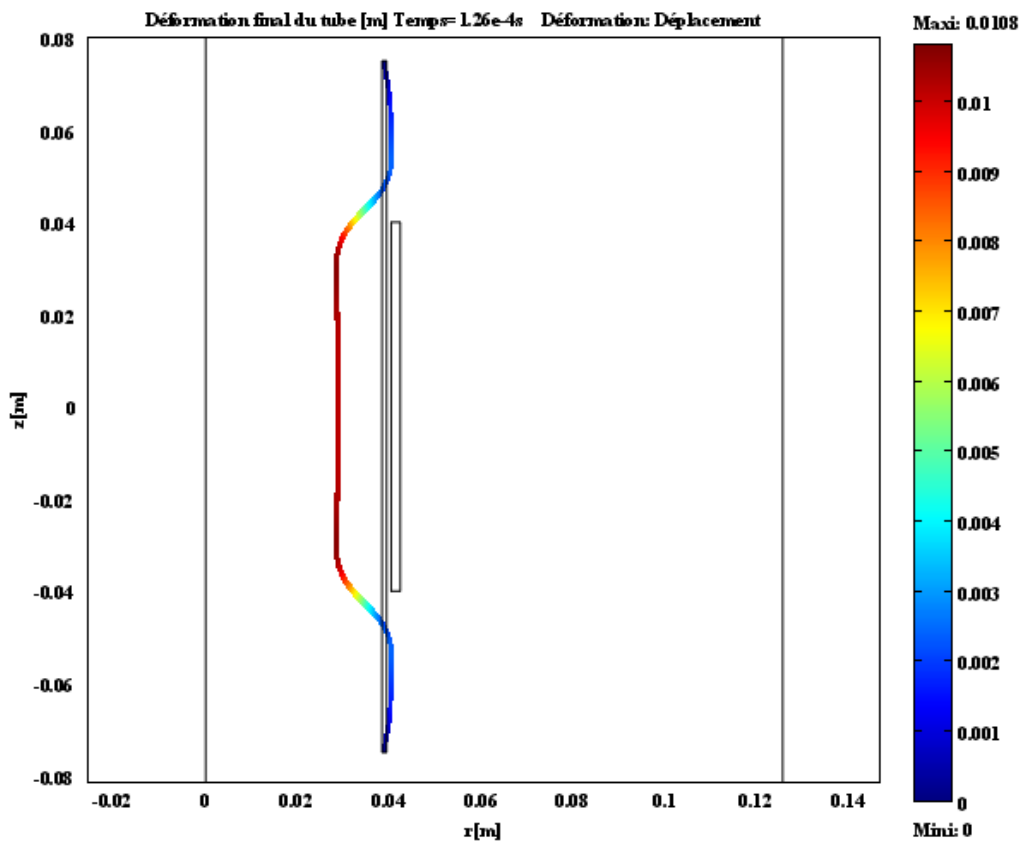


Figure III.10 : Forme finale du tube comprimé

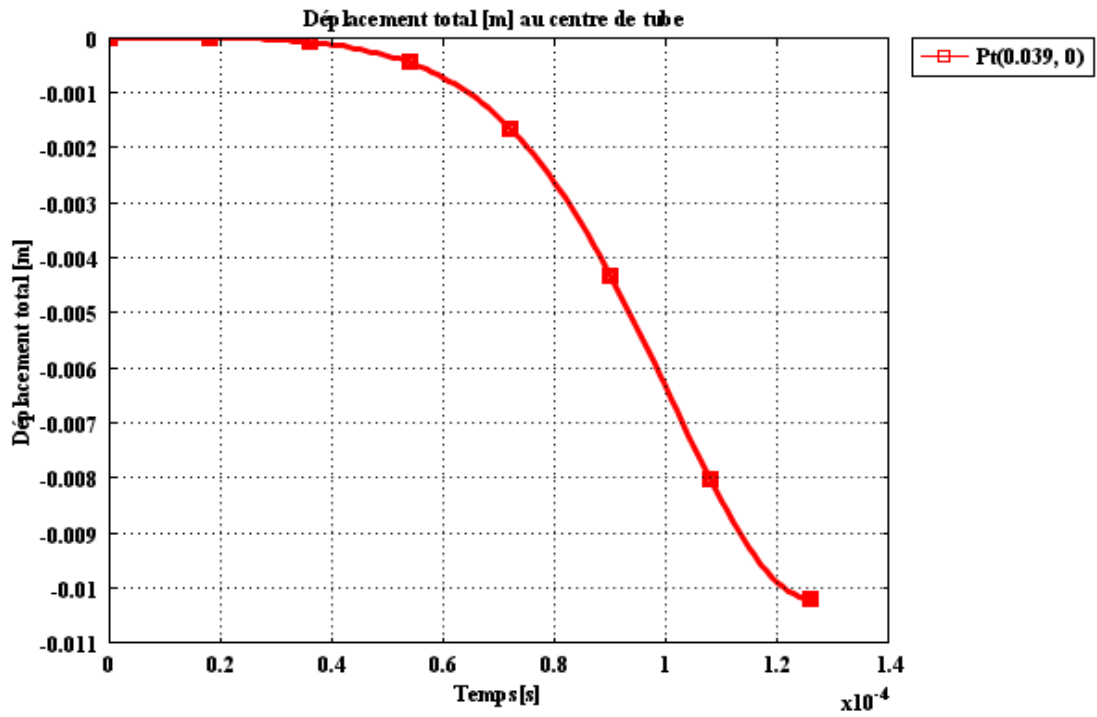


Figure III.11: Déplacement du centre du tube lors de sa compression

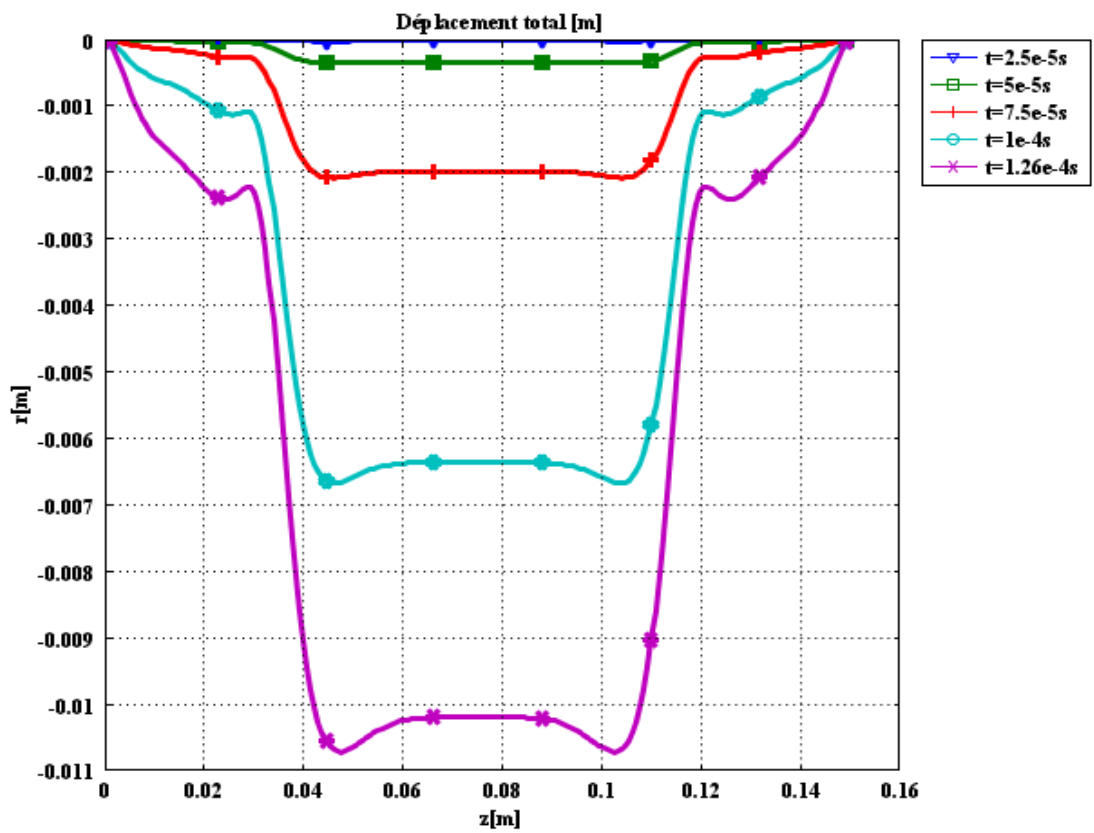
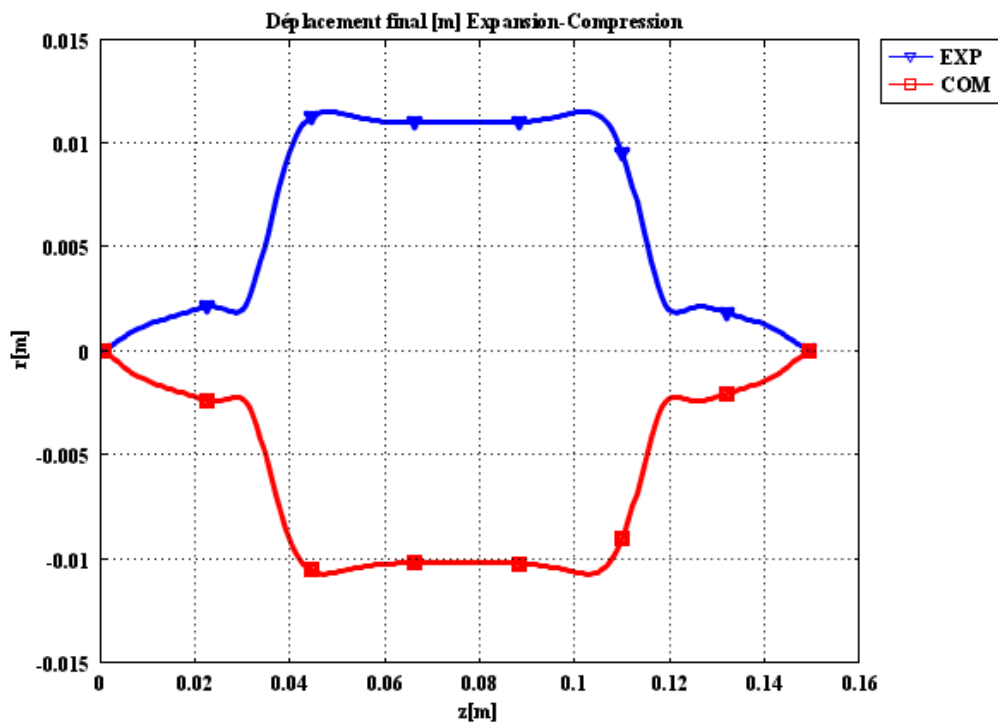
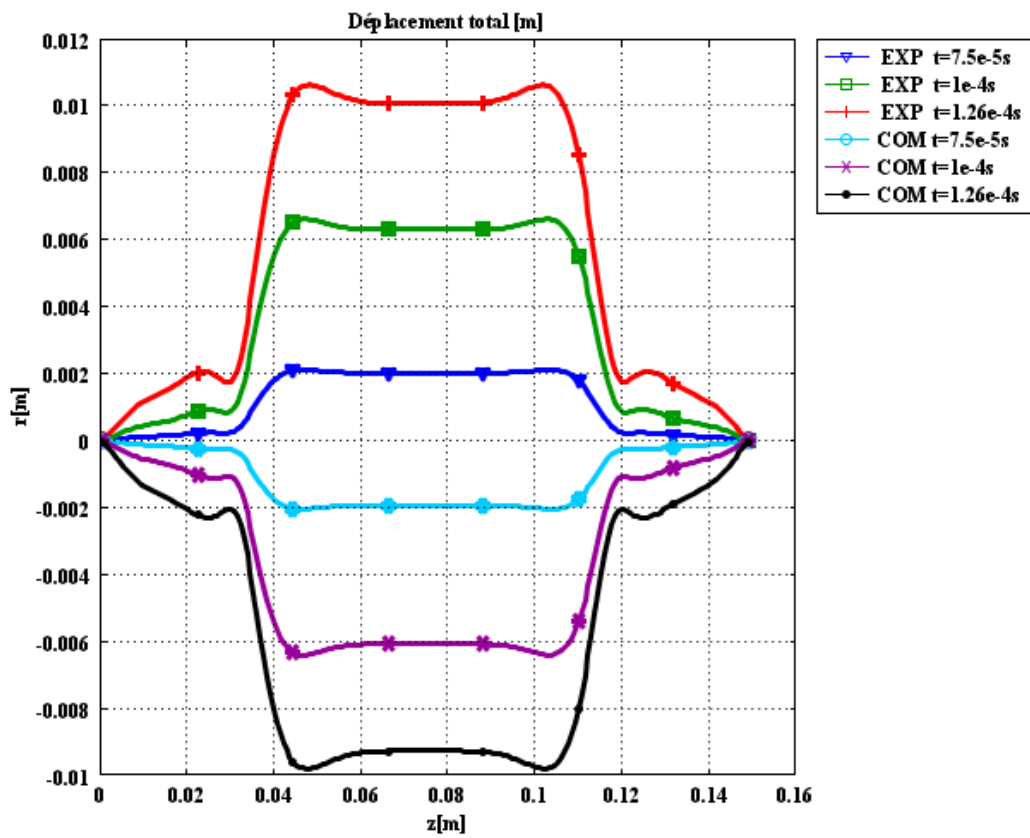


Figure III.12: Variation de la forme du tube à différents instants de la compression



(a) : Formes finales des tubes compressé et expansé à  $t=126\mu\text{s}$



(b) : Déformations des tubes à différents instants

Figure III.13: Déformation des tubes lors de la compression et l'expansion

### III.8 Expansion - compression des tubes

#### III.8.1 Système expansion-compression

D'après la bibliographie, les installations du formage magnétique sont très coûteuses, en particulier les générateurs avec les bancs de capacités, permettant la décharge impulsionnelle.

Par soucis d'économie et d'optimisation, et surtout dans les applications industrielles [32], la compression et l'expansion ont été réalisées avec un seul inducteur, de manière simultanée [32].

Dans cette installation industrielle [32], l'inducteur 1 est placé entre les deux tubes à déformer, de mêmes dimensions, permettant l'expansion du tube extérieur et la compression de celui intérieur. Le modèle géométrique de la simulation de ce système, montre un maillage comportant 8485 nœuds et 16872 éléments (Figure III. 14).

#### III.8.2 Analyse des résultats

En considérant le même courant de décharge que précédemment (III.1) (Figure III. 3), les résultats numériques montrent la possibilité d'obtenir l'expansion et la compression simultanées de deux tubes avec un seul inducteur (Figure III. 15-16). Les formes obtenues sont quasiment semblables à celles obtenues séparément par les applications précédentes (Figure III. 17) et confirment l'utilité industrielle de cette installation [30].

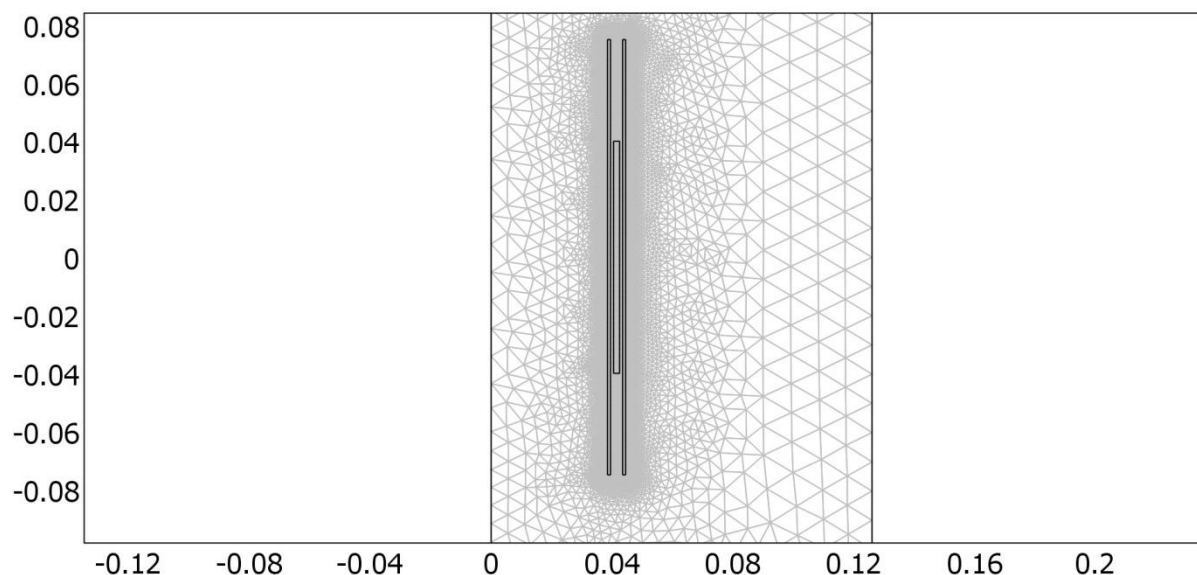


Figure III. 14 : Modèle géométrique expansion-compression avec maillage adopté

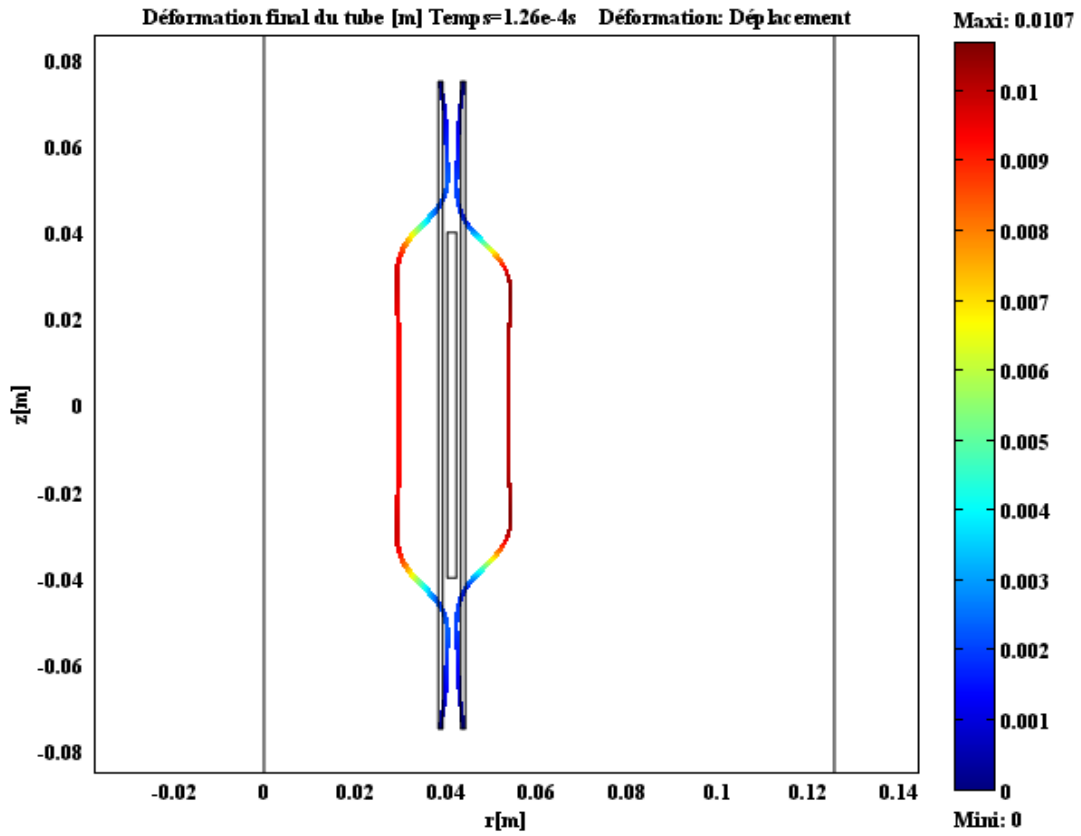


Figure III. 15 : Formes finales du système expansion-compression

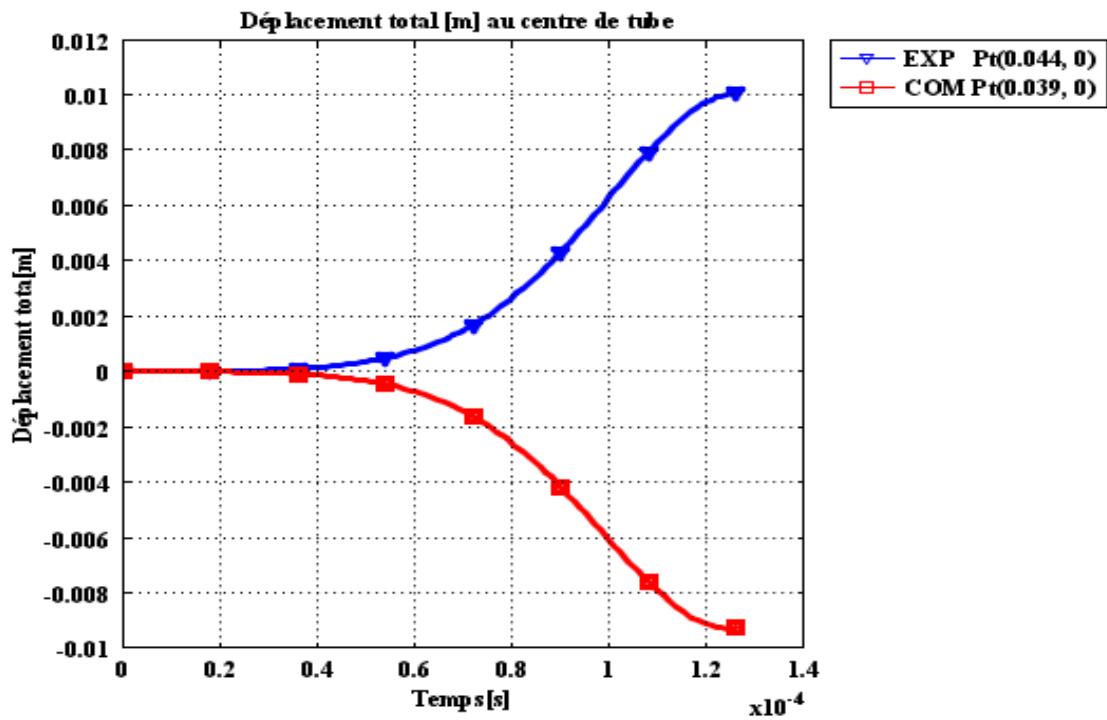


Figure III. 16 : Evolution du déplacement des centres des tubes

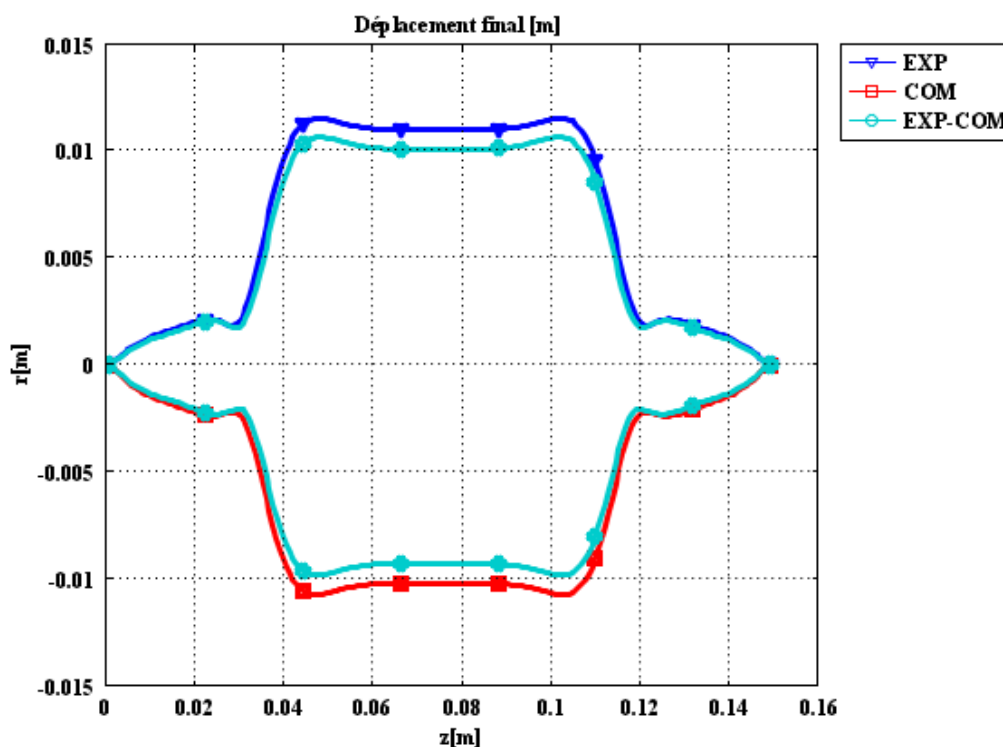


Figure III. 17 : Formes finales des tubes obtenues par les 3 applications

### III.8.3 Etude paramétrique

En utilisant le système précédent d'expansion-compression, une étude paramétrique a été menée pour analyser l'effet de certains paramètres du processus d'expansion-compression sur la formabilité des tubes. Nous avons choisis comme paramètres géométriques : l'entrefer entre l'inducteur et les tubes et l'épaisseur de ces derniers, en plus du courant de décharge, représentant l'énergie du générateur, comme paramètre physique.

#### III.8.3.1 Effet des paramètres géométriques

Dans ce travail, nous voulons étudier l'effet de la distance entre l'inducteur et le tube sur la déformation du tube en Aluminium. Pour cela, nous avons considéré deux valeurs d'entrefer, très utilisées dans les installations industrielles, à savoir :  $G = (0.5\text{mm}, 1\text{mm})$ .

Pour l'épaisseur des tubes déformés, nous avons considéré trois différentes valeurs d'épaisseur  $e = (0.5\text{mm}, 1\text{mm}, 1.5\text{mm})$ .

#### III.8.3.2 Effet du courant de décharge

Afin d'étudier l'effet de la puissance du générateur sur l'expansion-compression des tubes, nous avons considéré en plus du courant précédemment utilisé, un autre courant ayant

une amplitude plus faible (III.2) et un autre avec une amplitude plus importante (III.3). L'effet de la fréquence du courant et l'amortissement de l'impulsion n'ont pas été analysés.

$$J_{\varphi} = 2,324 \cdot 10^{10} * \exp(-2621.7 \cdot t) * \sin(17888 \cdot t) \quad (\text{III.2})$$

$$J_{\varphi} = 6 \cdot 10^{10} * \exp(-2621.7 \cdot t) * \sin(17888 \cdot t) \quad (\text{III.3})$$

### III.8.3.3 Analyse des résultats

Selon les travaux antérieurs [30-32], les paramètres géométriques, l'entrefer et l'épaisseur de la pièce ainsi que le courant de décharge sont étroitement liés.

Les figures (III. 18 a- i) montrent les formes des tubes comprimés et expansés dans les différents cas, avec les différentes valeurs des paramètres géométriques et physiques étudiés.

Les remarques les plus importantes tirées de ces résultats numériques sont :

- Avec des courants de mêmes amplitudes, la déformation est plus affectée par l'épaisseur du tube que par l'entrefer (Figures III. 18 a-b-c) (Figures III. 18 d-e-f) (Figures III. 18 g-h-i).
- Avec des tubes de mêmes épaisseurs, la déformation augmente, de manière appréciable, avec l'augmentation de l'amplitude du courant de décharge (Figures III. 18 a-d-g) (Figures III. 18 b-e-h) (Figures III. 18 c-f-i).
- L'effet de l'entrefer est plus accentué avec les tubes de faibles épaisseurs et les courants les plus importants (Figures III. 18 c)

Les résultats numériques obtenus (Figures III.18) (Tableau III.3) (Figures III.19-21), seraient mieux analysés si une technique statistique a été utilisée. Faute de quoi, l'analyse a été faite de manière classique par comparaison des différentes déformations des tubes dans les différents cas, pour déterminer les paramètres géométriques et physiques les plus significatifs qui affectent la formabilité des pièces tubulaires magnétiquement déformés.

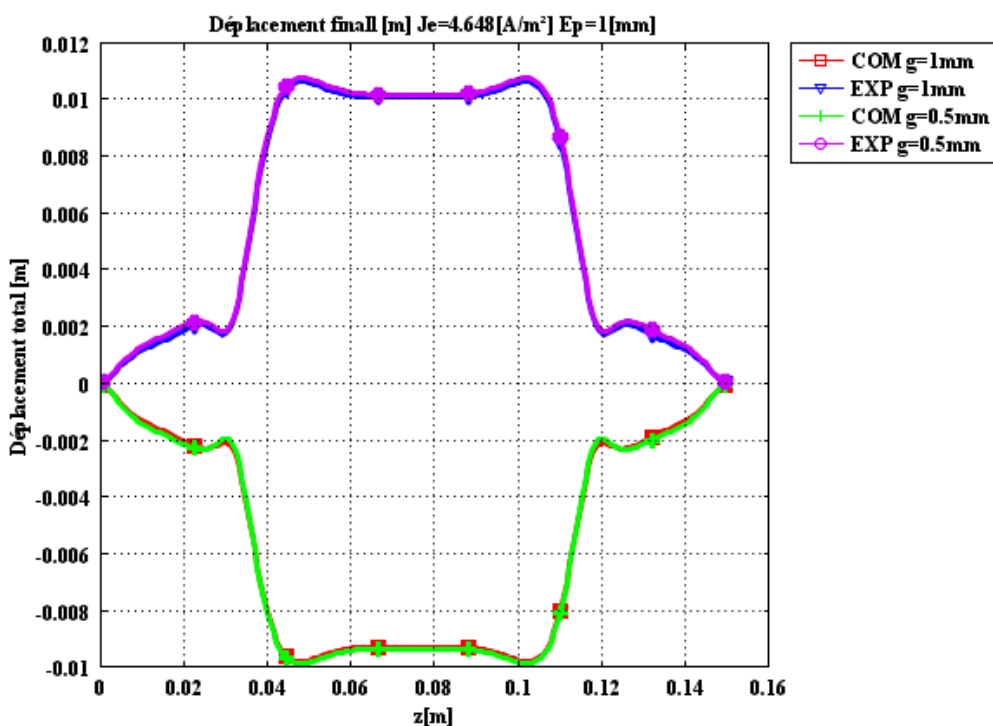
Les conclusions que nous pouvons faire :

- L'effet de l'énergie de décharge (courant de décharge) est bien remarquable, la formabilité des tubes est beaucoup accentuée avec l'augmentation de l'énergie (augmentation du courant de décharge).
- La déformation la plus élevée (18,3 mm pour l'expansion et 18,2 mm pour la compression) est atteinte pour une combinaison (Densité de courant

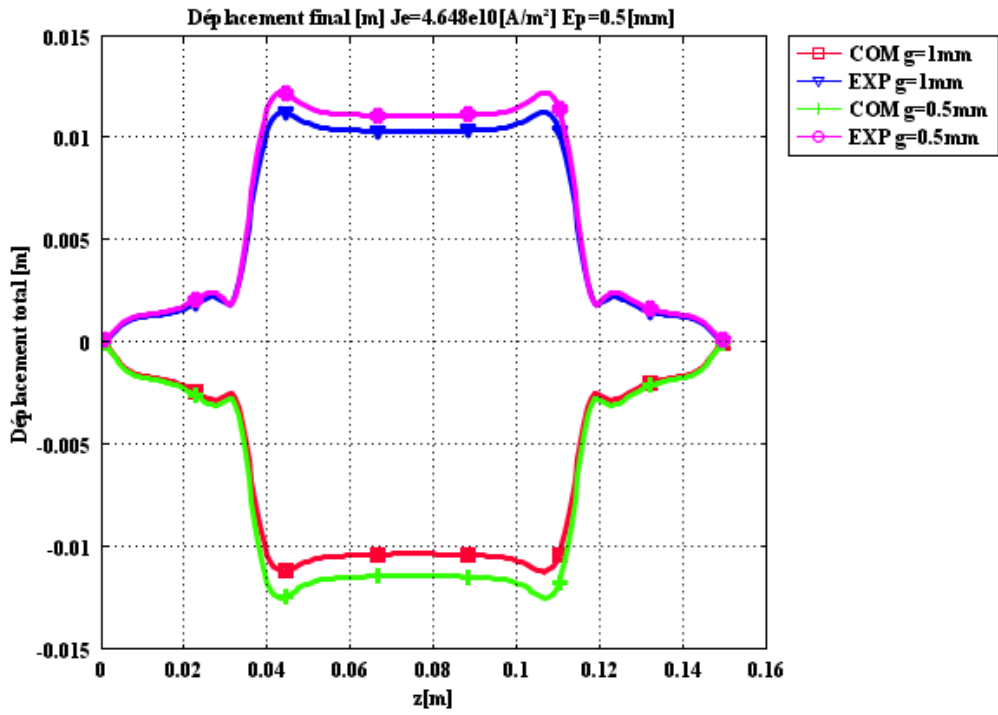


d'amplitudes  $6A/m^2$ , entrefer de 0,5 mm et épaisseur du tube de 0,5 mm), tandis que la déformation la plus faible de 1,08 mm, en expansion et 1,9 mm, en compression, est atteinte pour une combinaison (Densité de courant d'amplitudes  $2,324 A/m^2$ , entrefer de 1 mm et 1,5 mm d'épaisseur du tube).

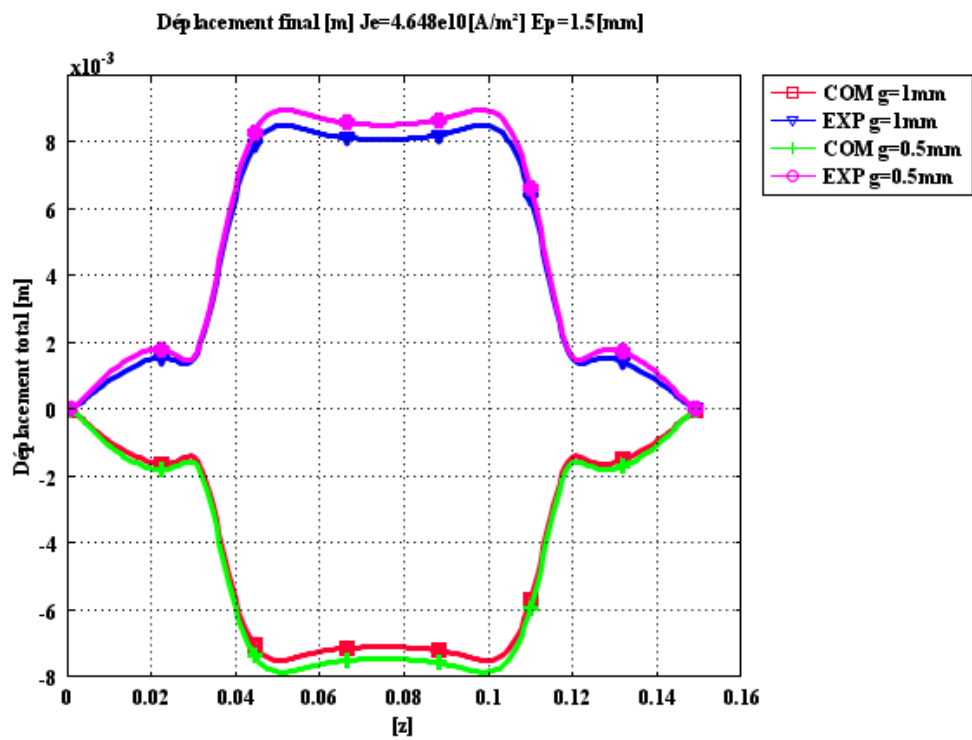
- En comparant entre l'effet de l'entrefer et celui de l'épaisseur de tube, nous pouvons conclure, d'après les résultats de cette étude paramétrique que l'effet de l'épaisseur de tube est plus significatif que celui de l'entrefer.



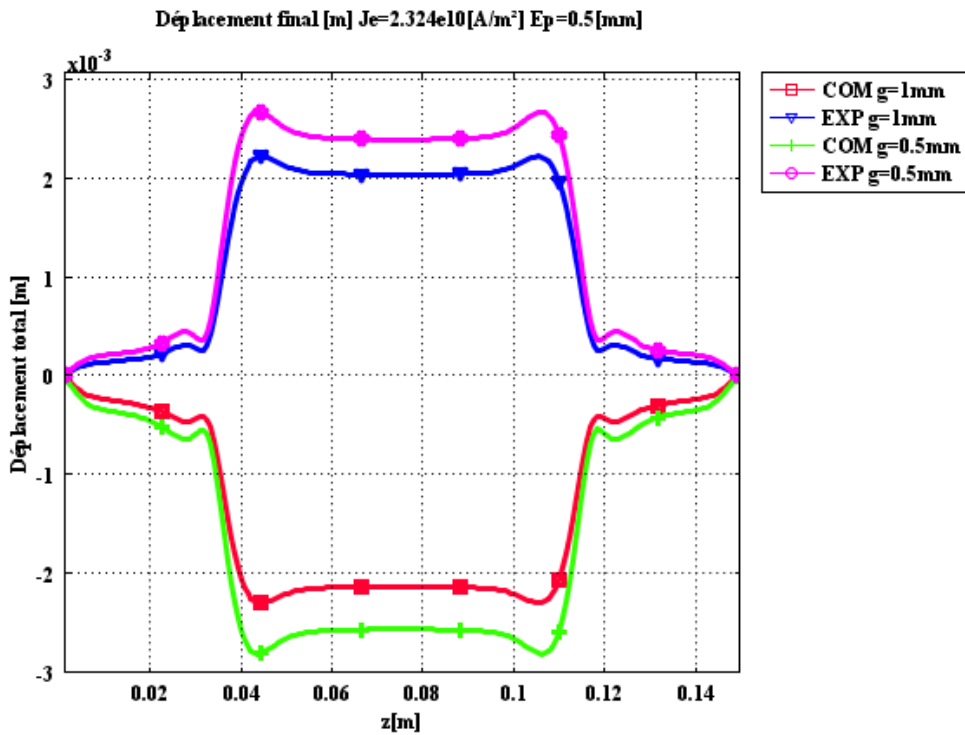
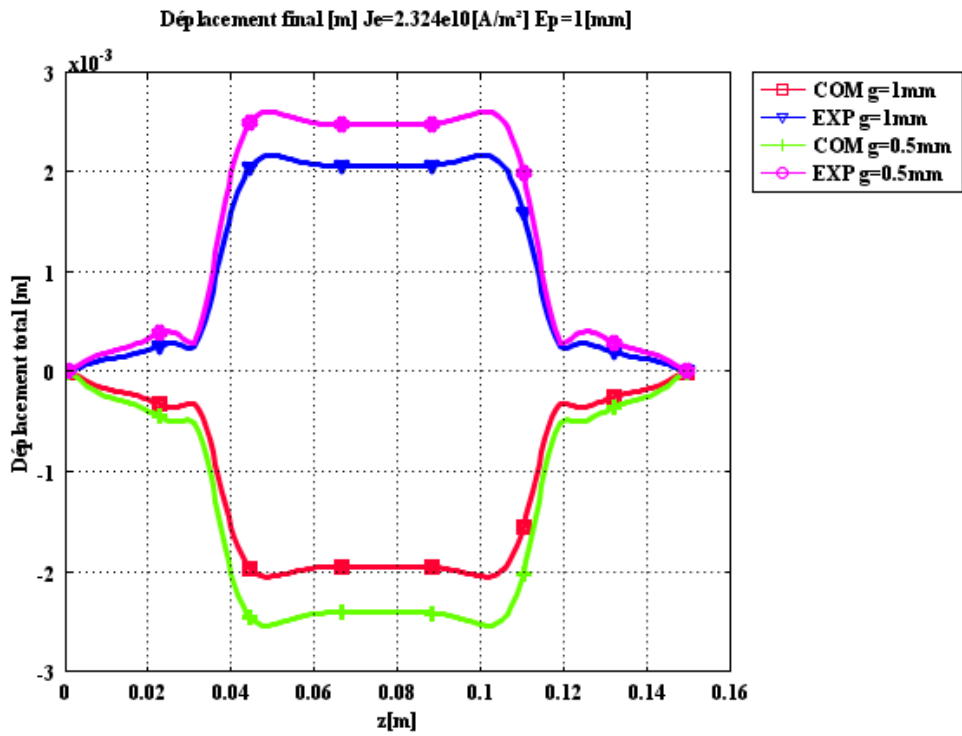
(a)

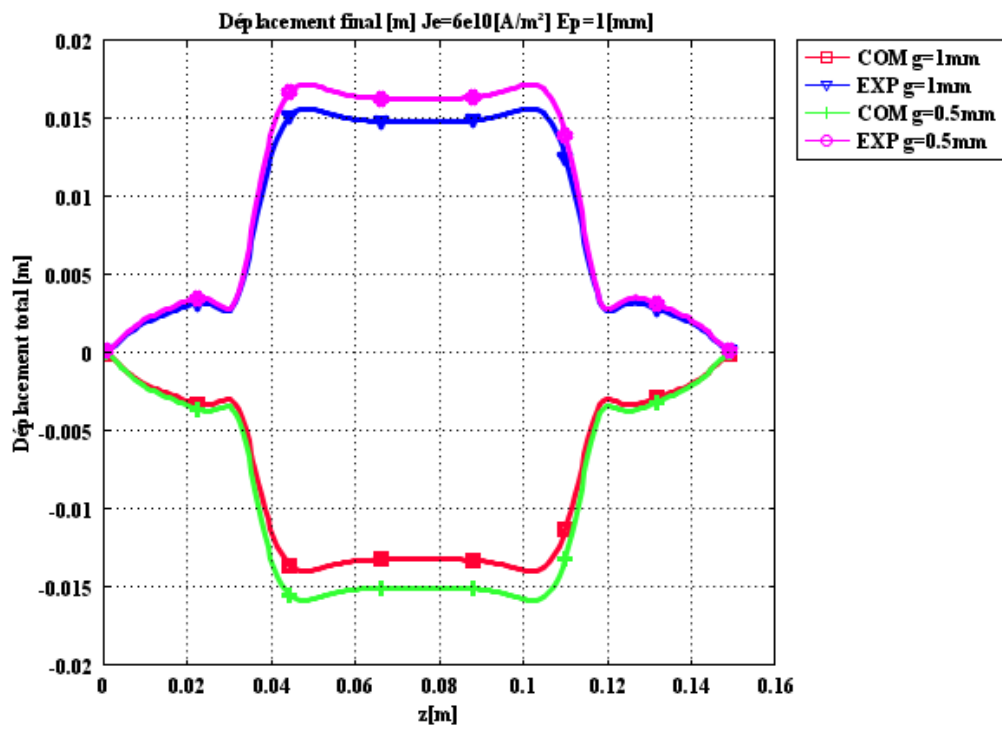
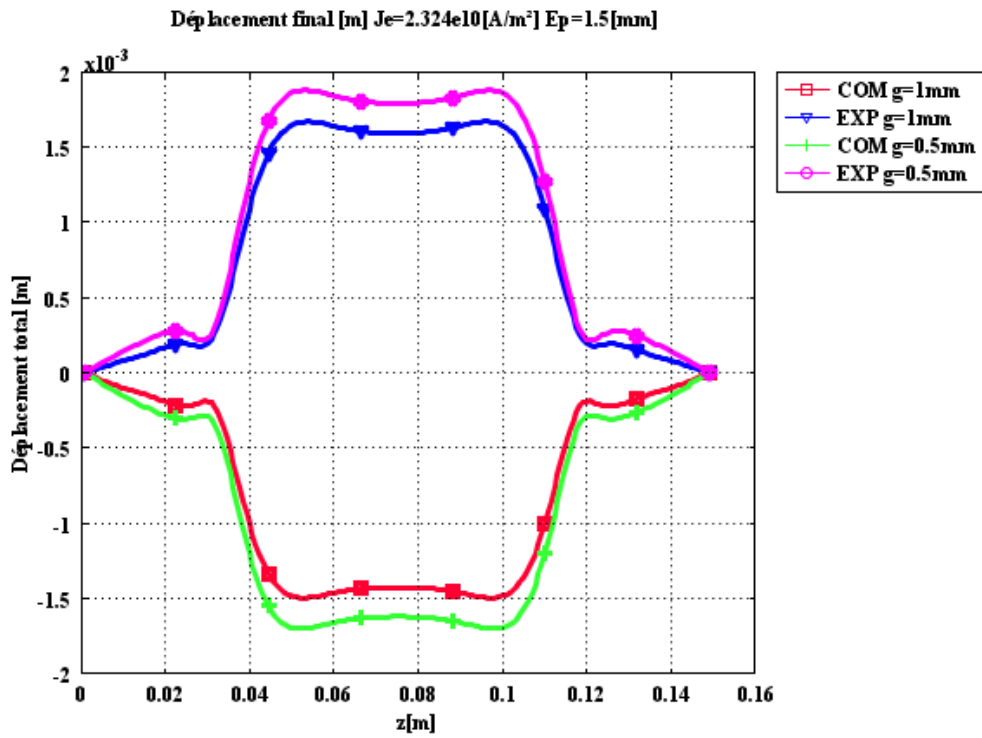


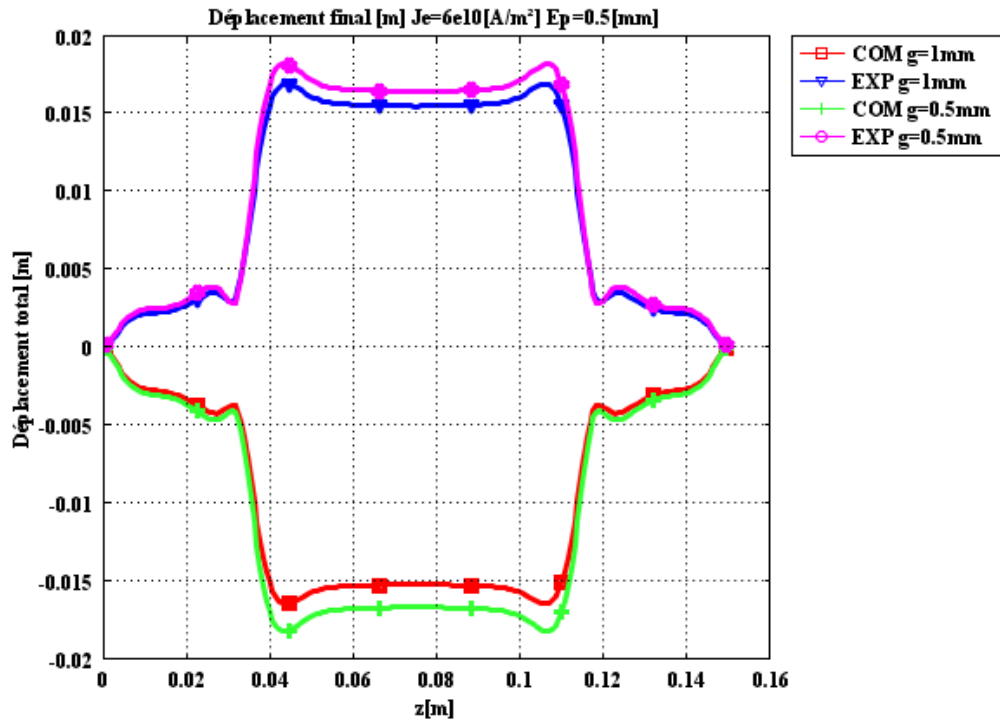
(b)



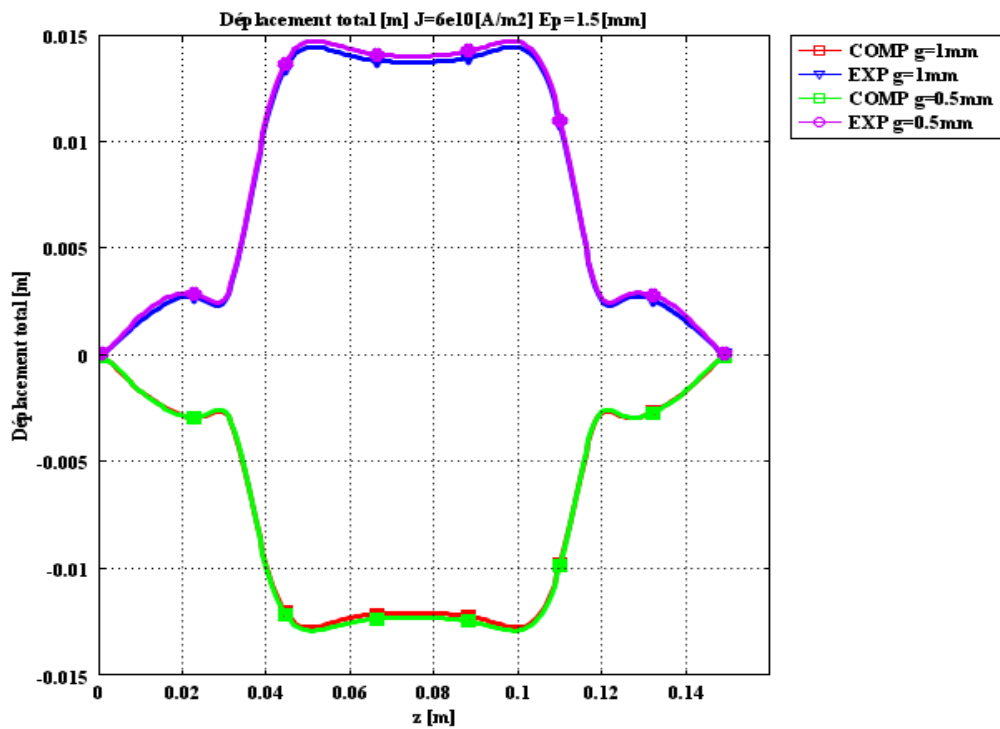
(c)







(h)



(i)

Figure III. 18 : Formes des tubes obtenues dans les différents cas étudiés

Tableau III.3 : Différents cas de l'étude paramétrique

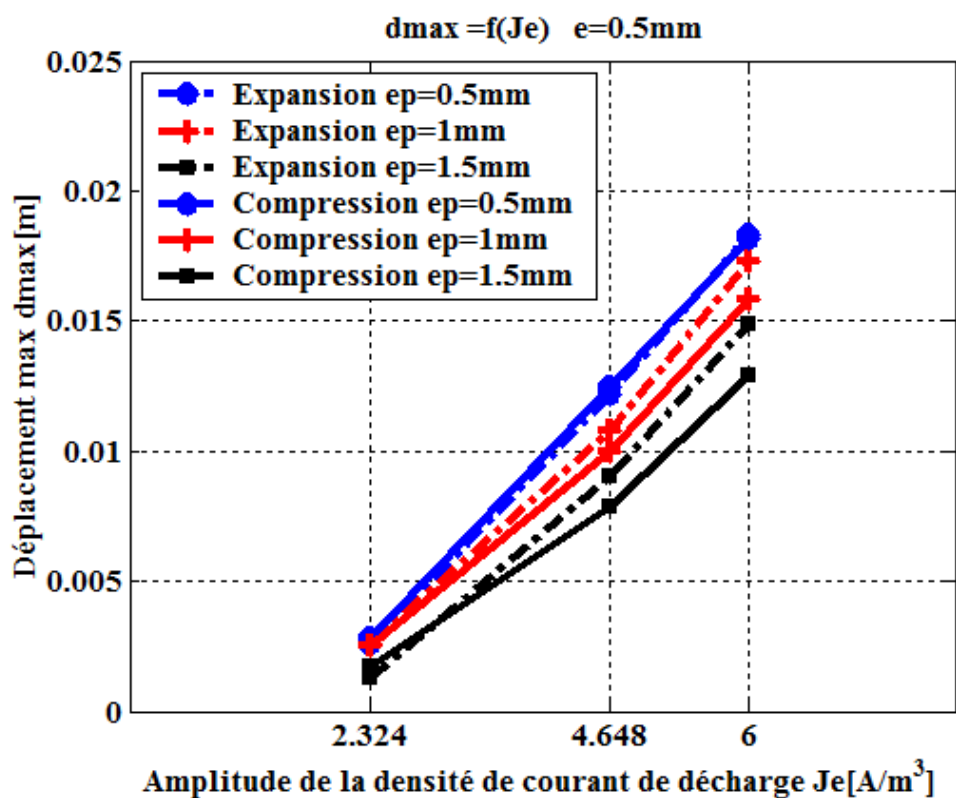
N°	Amplitude de la densité de courant de décharge [A/m <sup>2</sup> ]	Epaisseur du tube ep[mm]	Entrefer e[mm]	T <sub>max</sub> [μs]	d <sub>max</sub> Expansion [mm]	d <sub>max</sub> Compression [mm]
01	4,648 .10 <sup>10</sup>	1	1	126	10,7	9,8
02		0,5	1	115	11,3	11,3
03		1,5	1	129	8,53	7,5
04		1	0,5	116	10,8	10
05		0,5	0,5	105	12,2	12,5
06		1,5	0,5	123	9,02	7,85
07	2,324 .10 <sup>10</sup>	1	1	128	2,17	2,05
08		0,5	1	116	2,22	2, 3
09		1,5	1	135	1,08	1,9
10		1	0,5	120	2,63	2,52
11		0,5	0,5	116	2,63	2,83
12		1,5	0,5	118	1,3	1,7
13	6 .10 <sup>10</sup>	1	1	124	15,7	14
14		0,5	1	115	16,9	16,4
15		1,5	1	129	14,6	12,8
16		1	0,5	118	17,3	15,8
17		0,5	0,5	110	18,3	18,2
18		1,5	0,5	122	14,9	12,9

La relation entre la déformation et les paramètres de processus est indiquée par les figures (III.19-20-21).

Nous pouvons déduire que l'énergie de décharge, c'est-à-dire que le courant circulant dans la bobine a l'effet le plus important sur la déformation (figure III.19): Plus l'énergie est élevée, plus la déformation est élevée, alors qu'avec une augmentation de l'épaisseur du tube la déformation diminue (figure III. 20). Le même effet est remarqué pour l'épaisseur de l'entrefer, (figure III. 21).

Finalement, l'énergie du générateur est le paramètre le plus significatif suivi de l'entrefer (distance entre le tube et l'inducteur), tandis que l'épaisseur du tube n'est pas un paramètre très significatif.

Ces résultats obtenus à partir de la simulation sont en accord avec les travaux expérimentaux [30-31-32].



(a) :  $e=0.5\text{mm}$

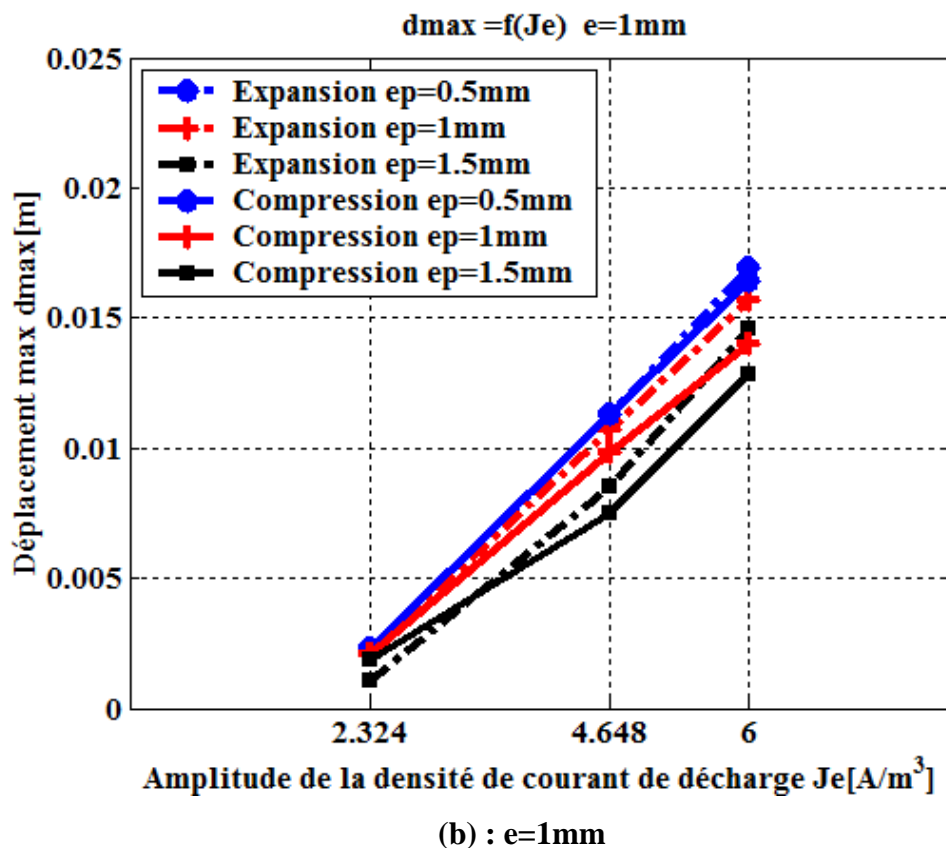
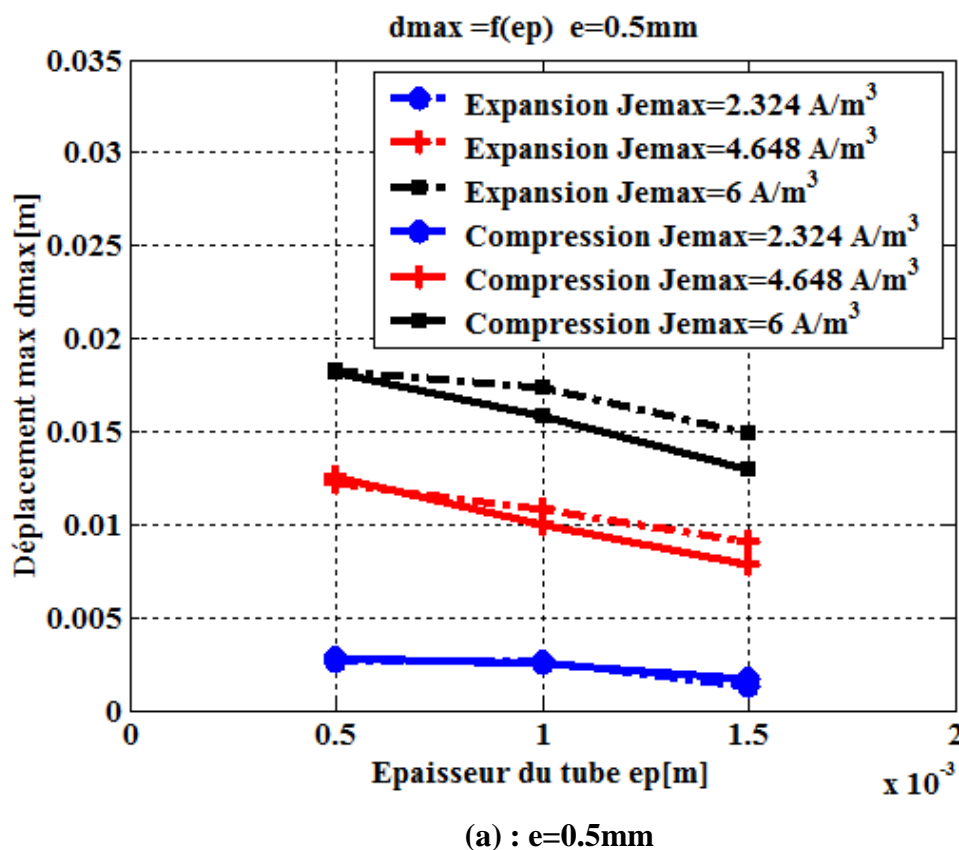


Figure III. 19 : Effet du courant de décharge sur le déplacement maximal du tube





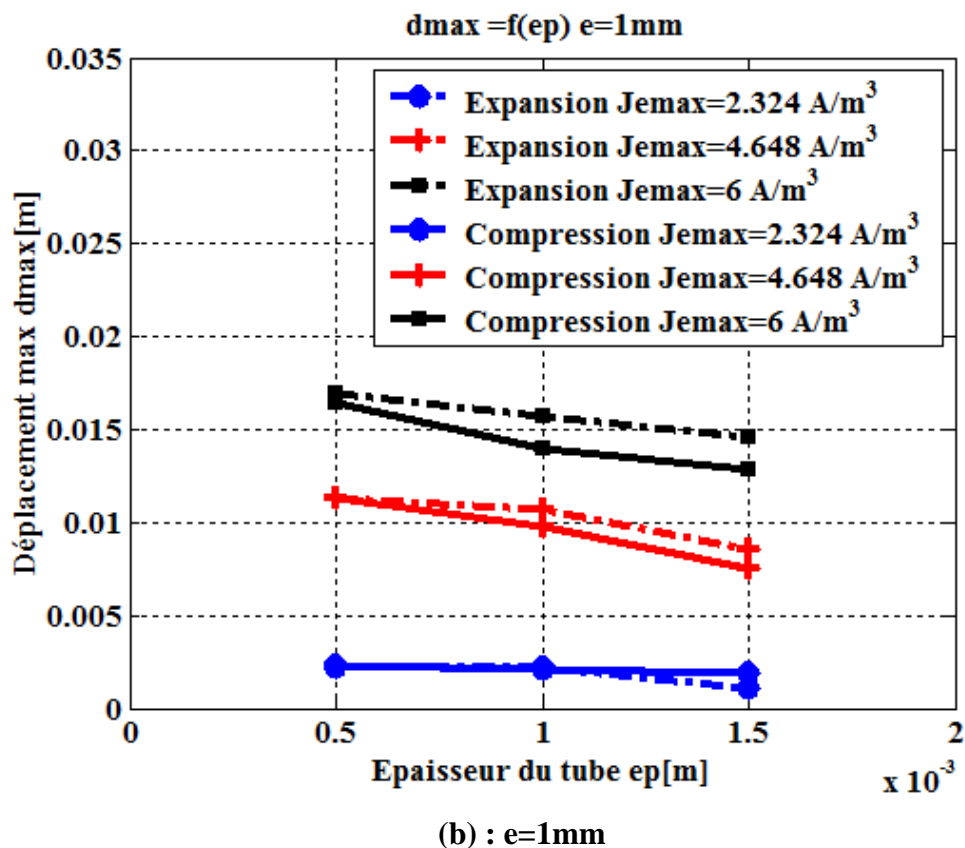
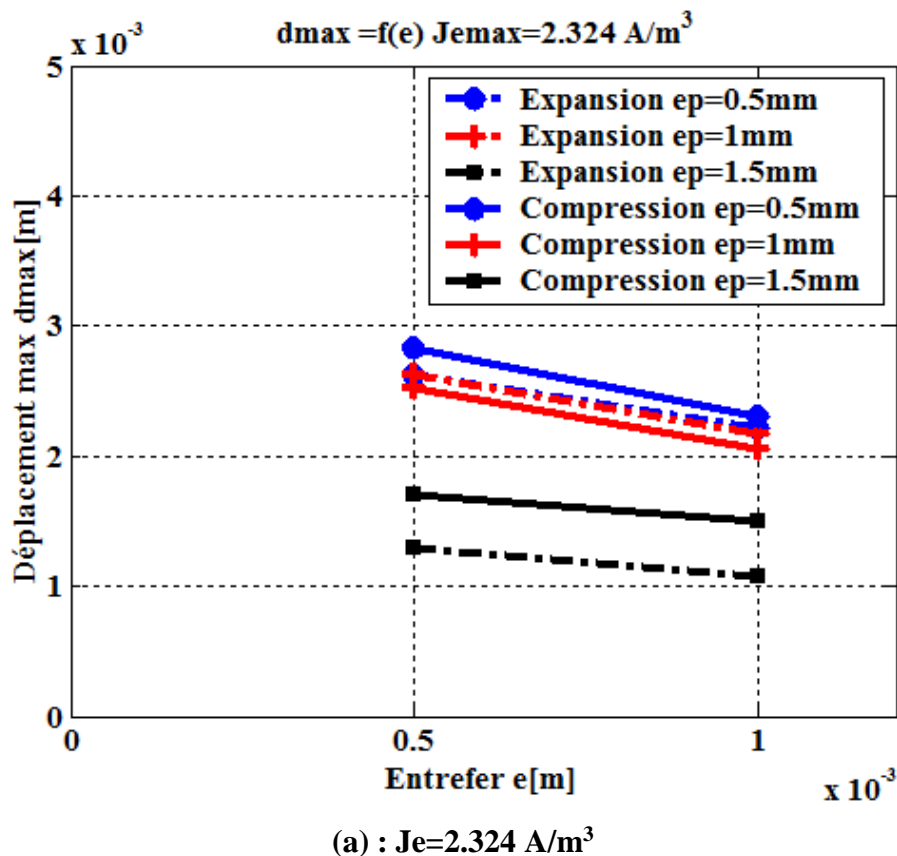
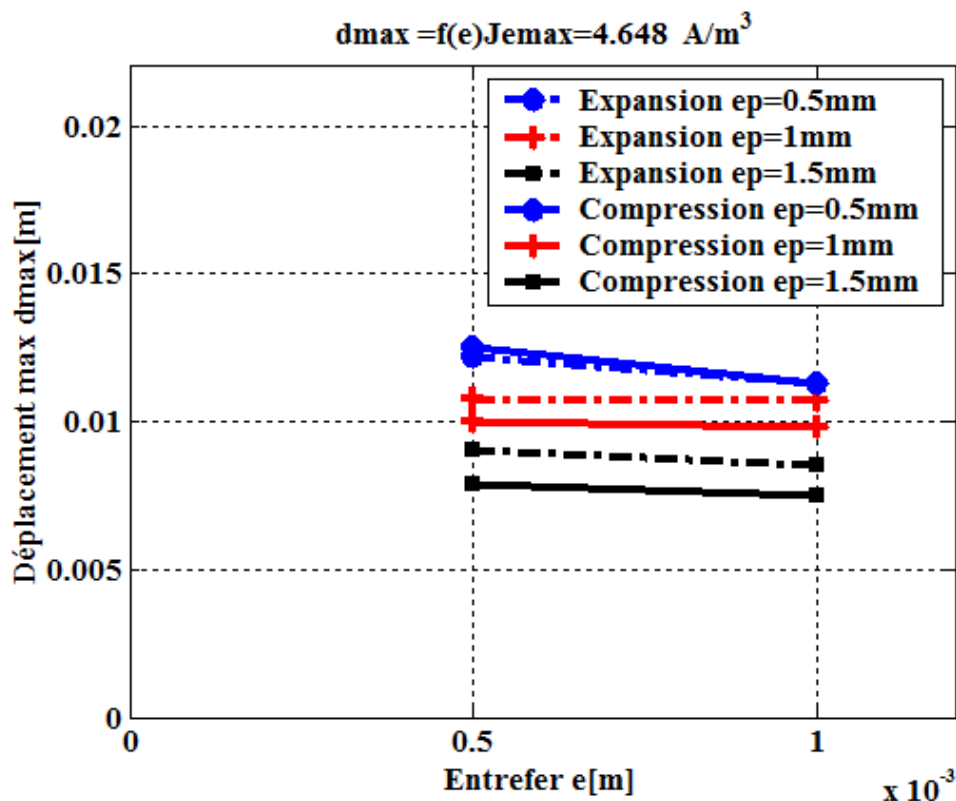
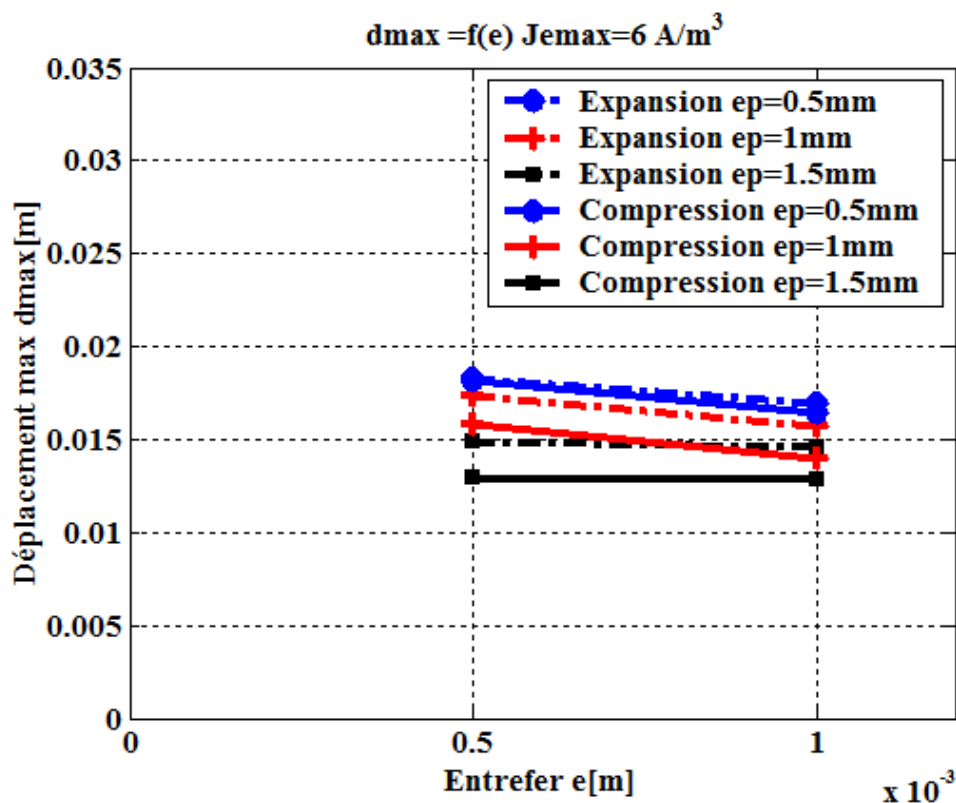


Figure III. 20 : Effet de l'épaisseur du tube sur le déplacement maximal du tube





(b) :  $J_e = 4.648 \text{ A/m}^3$



(c) :  $J_e = 6 \text{ A/m}^3$

Figure III. 21 : Effet de l'entrefer sur le déplacement maximal du tube

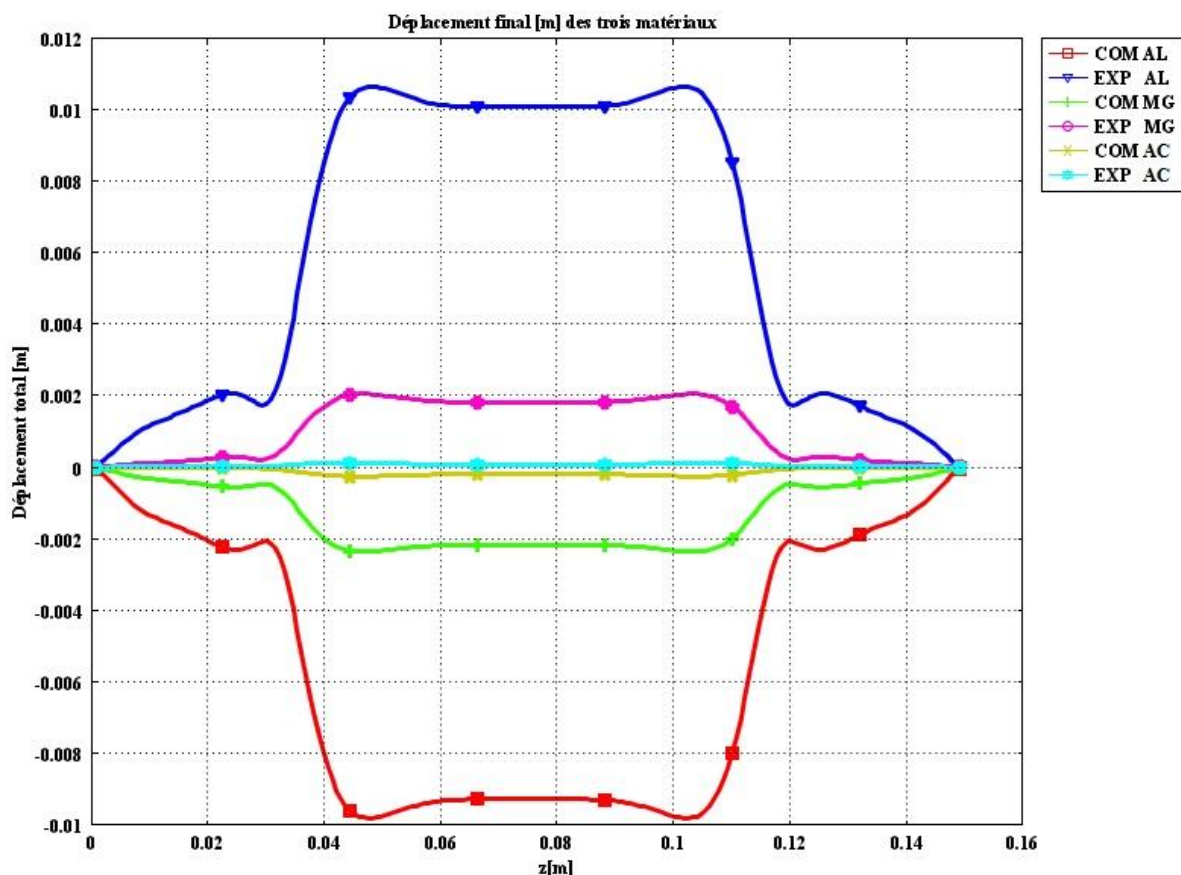
### III.8.4 Effet du matériau des tubes

Une étude comparative sur la nature du matériau de tube et ses caractéristiques a été menée, en utilisant le système précédent d'expansion-compression, afin d'analyser les différences de comportement entre les différents matériaux ayant différentes caractéristiques (Tableau III.1).

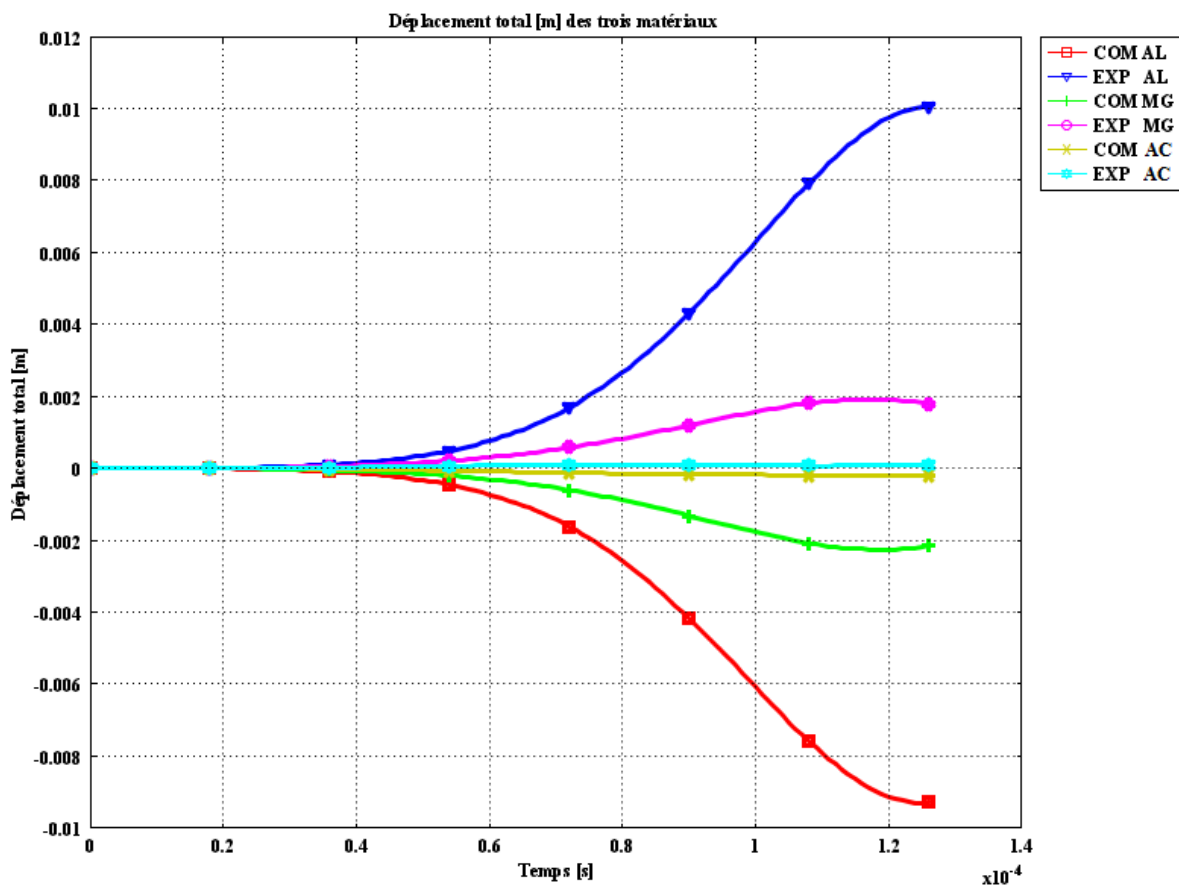
Le but de cette étude est de montrer les différences de comportement de chaque matériau sous les mêmes conditions de formage et d'analyser leur formabilité.

A partir des résultats numériques, nous pouvons, clairement, remarquer que l'Aluminium est le matériau qui présente la meilleure formabilité sous pression magnétique, grâce à ses propriétés électromagnétiques et mécaniques, en particulier, la conductivité électrique, le module de Young et le coefficient de poisson (figures III. 22 a-b).

Ce résultat est confirmé par le fait que ce matériau est de plus en plus utilisé avec cette technique de FEM, en particulier dans l'industrie d'automobile [32].



(a) : Formes finales des tubes comprimés et expansés à  $t=126\mu\text{s}$



(b) : Déformations du centre des tubes à différents instants

Figure III.22: Comparaison de l'Aluminium, Magnésium et l'Acier sous FEM

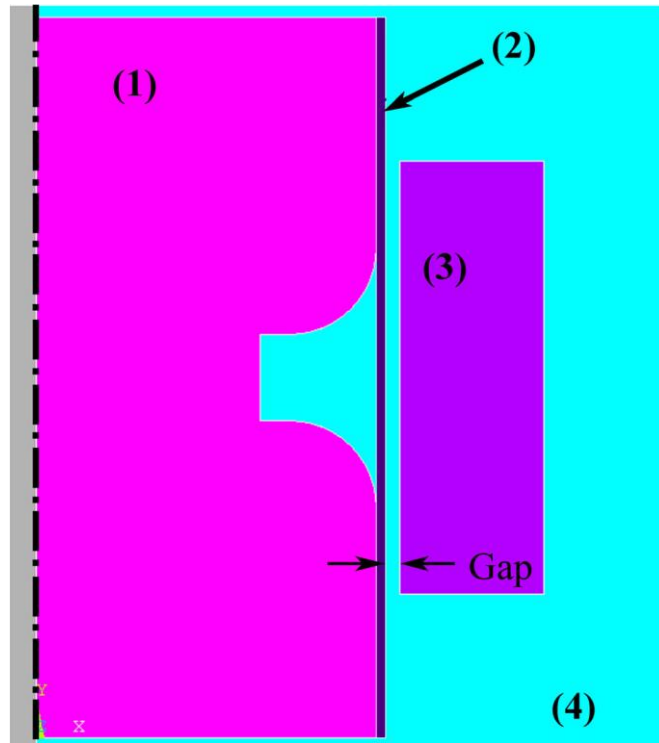
### III.9 Compression de tube avec matrice 2D

#### III.9.1 Installation et système simulé

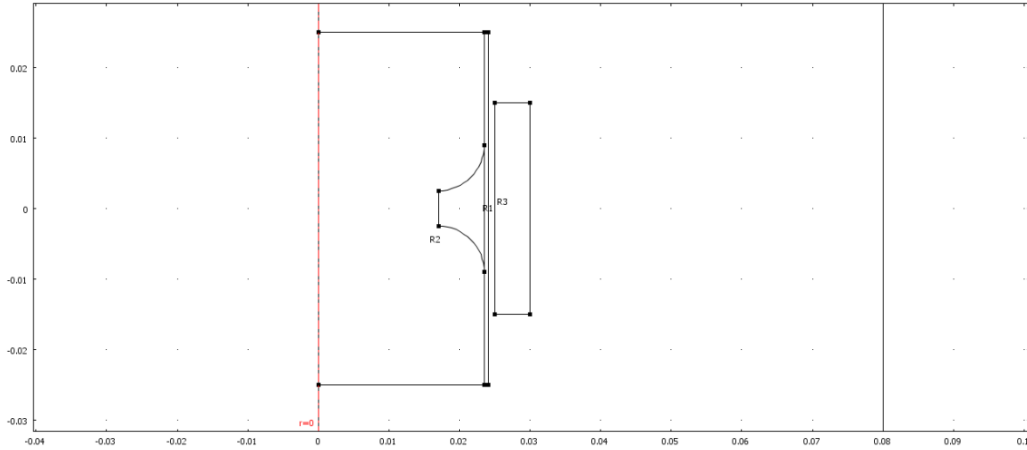
Cette application concerne la simulation numérique de la mise en forme, par pression magnétique, de tubes sur une matrice, avec un creux, utilisant différents inducteurs de compression (Tableau III.2).

Le système de compression avec matrice (figure III. 23) est semblable à celui de la référence [33]. Il comporte un tube en alliage d'aluminium (Tableau III.1), de longueur 50 mm, de diamètre intérieur 47 mm et d'épaisseur 0.625 mm, à l'intérieur d'un inducteur (Tableau III.2) et une matrice de formage de longueur 50 mm.

Le courant de décharge du banc de capacité utilisé, de forme sinusoïdale amortie, est représenté par sa densité sur la figure (Figure III. 24)

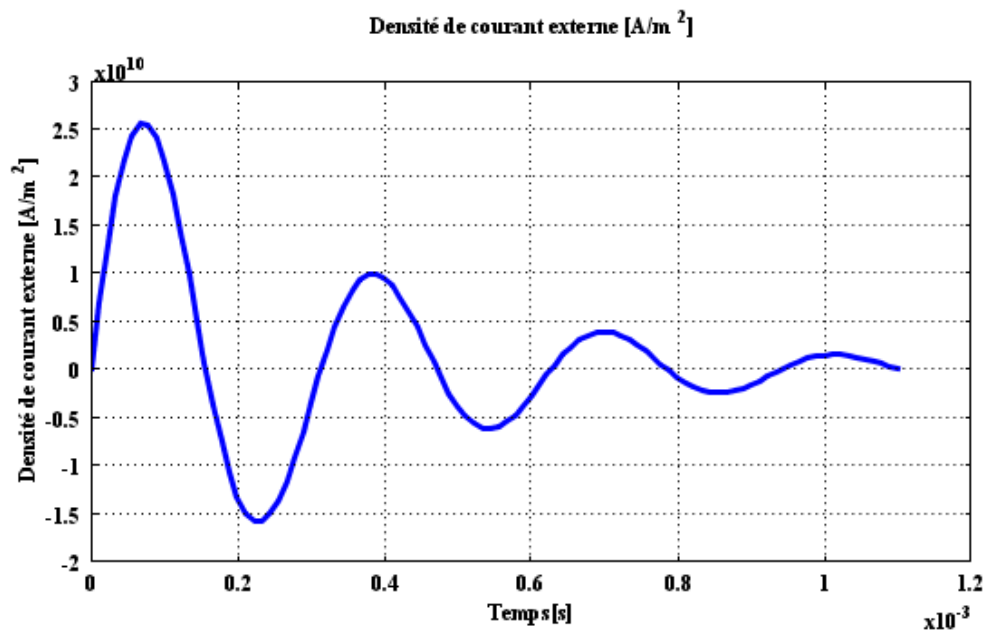


(a) : Installation expérimentale [33] avec (1) la matrice, (2) le tube et (3) l'inducteur



(b) : Système simulé

Figure III. 23: Système de compression de tube avec matrice



**Figure III. 24: Densité de courant de décharge considéré dans la simulation**

### III.9.2 Résultats de simulation

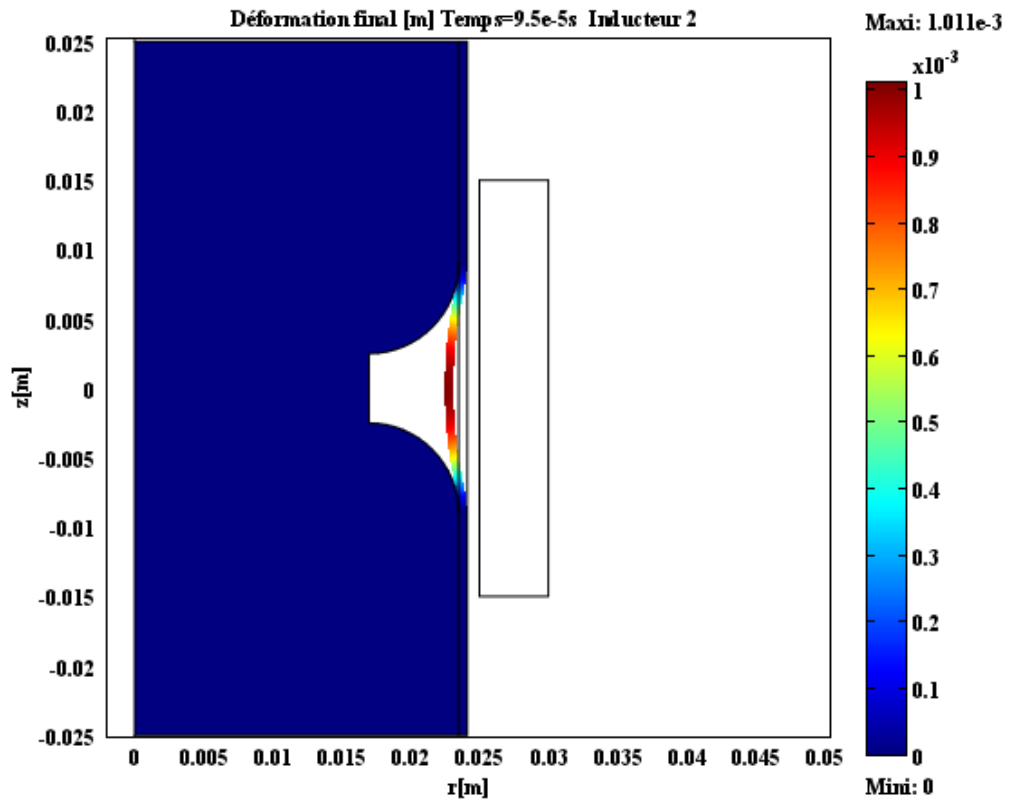
Les différents cas de simulation sont regroupés dans le tableau (Tableau III. 4). Ces cas comportent différents courants de décharge, associés aux différents inducteurs considérés.

Les résultats numériques, particulièrement les profils des tubes et les déformations maximales, montrent que les dimensions de l'inducteur sont responsables de la profondeur de pénétration du tube dans le creux de la matrice : plus la hauteur de l'inducteur est faible, plus la déformation du tube est accentuée par le fait que les densités de courant de décharge deviennent plus importants (surfaces plus faibles) et par conséquent, les forces et les pressions magnétiques sont plus importantes et concentrées dans la partie centrale entraînant la pénétration du tube qui épouse la forme de la matrice dans cette région (Tableau III. 4) (Figures III. 25 a-f).

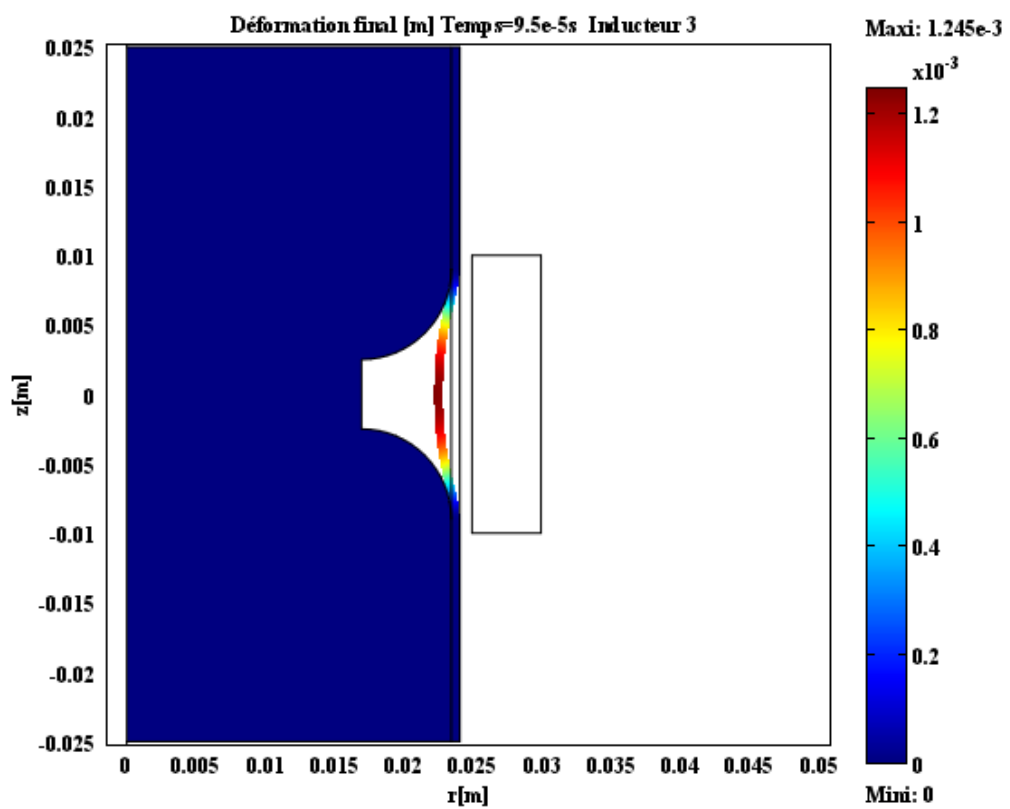
D'autre part, en éloignant le tube de la matrice (Tableau III. 4) (Figures III. 26 g-i), la déformation du tube est améliorée avec un temps maximum plus faible et cela peut être expliqué par le fait que cette distance entre le tube et la matrice permet au tube d'acquies une certaine énergie cinétique, et donc une vitesse de déformation plus grande, ce qui améliore la pénétration du tube à l'intérieur de la matrice [33].

Tableau III. 4 : Différents cas étudiés

Densité de courant de décharge [A/m <sup>2</sup> ]	Inducteur utilisé	Distance entre le tube et la matrice [mm]	tmax [μs]	dmax [mm]
$J_{\varphi}=3.2e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur2	0	95	1.011
$J_{\varphi}=3.5e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 3	0	95	1.245
$J_{\varphi}=5.0e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 4	0	90	2.421
$J_{\varphi}=6.8e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 5	0	90	3.32
$J_{\varphi}=10.1e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 6	0	85	4.2
$J_{\varphi}=25.5e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 7	0	70	4.736
$J_{\varphi}=6.0e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur2	1	95	3.124
$J_{\varphi}=5e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur2	0.5	90	2.605
$J_{\varphi}=4.3e10 * \exp(-3e3 * t) * \sin(2e4 * t)$	Inducteur 2	0.25	90	1.905

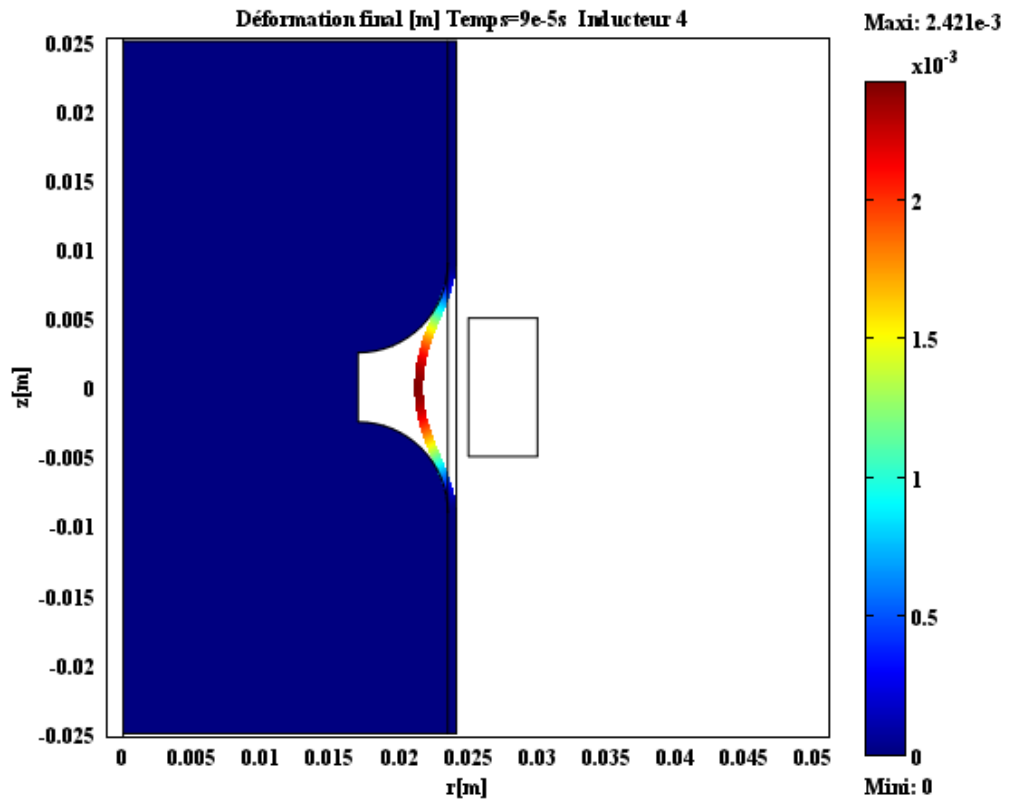


(a) Inducteur 2

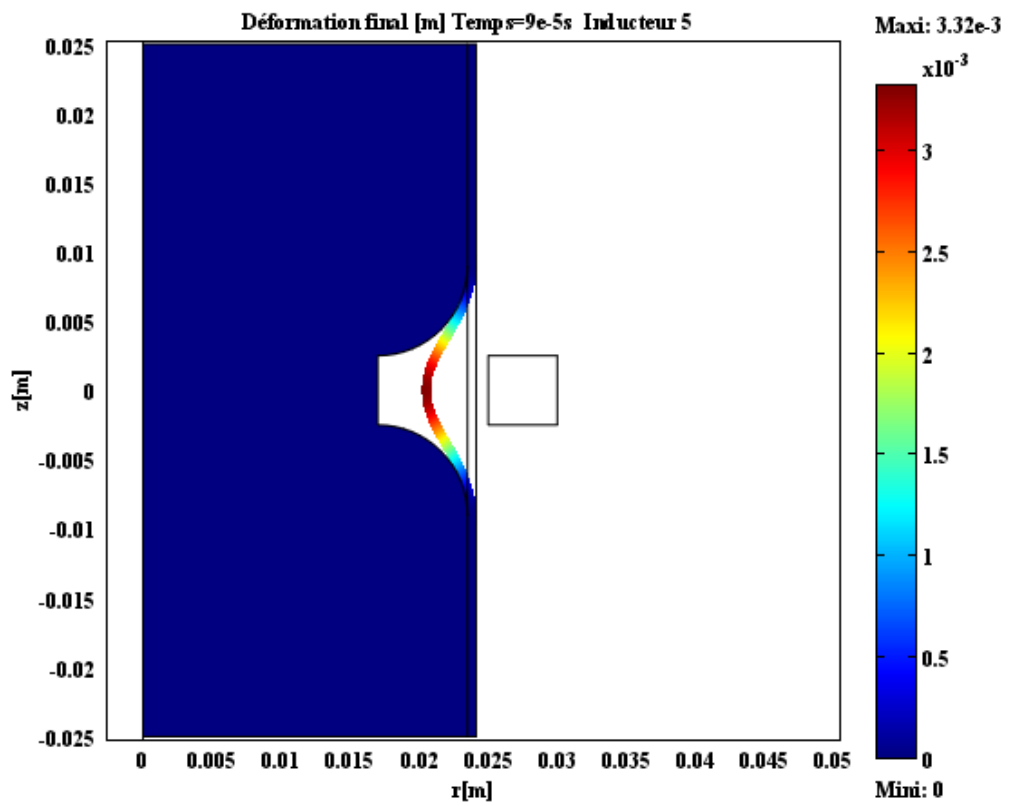


(b) Inducteur 3

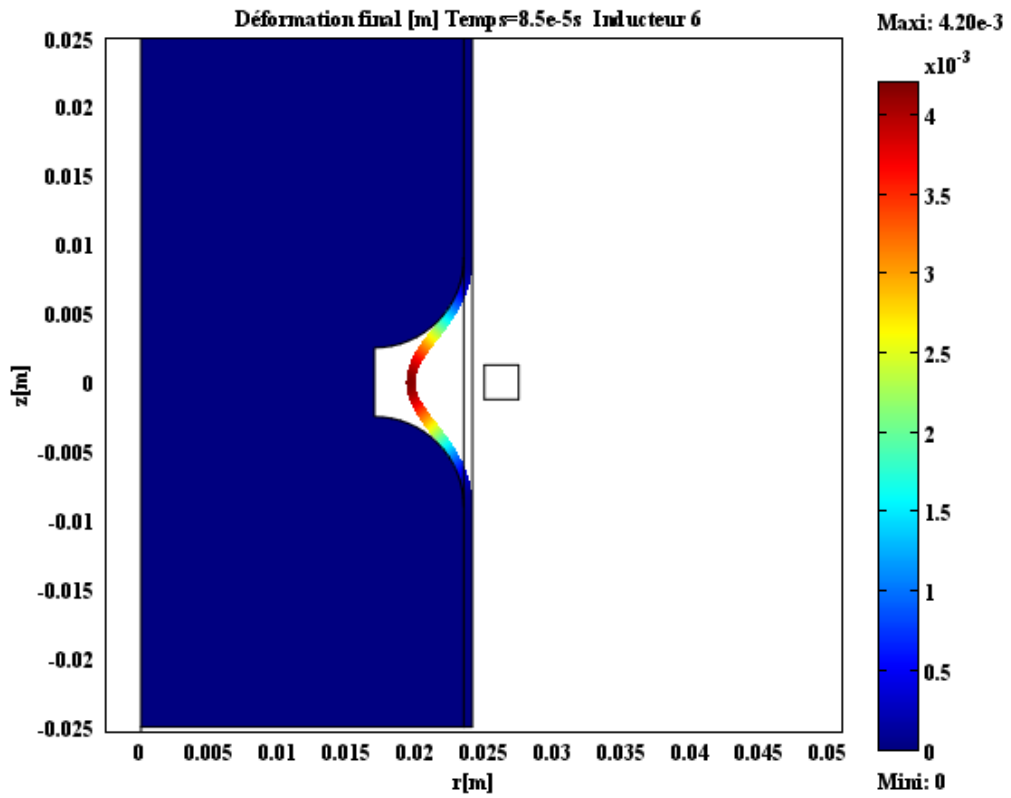




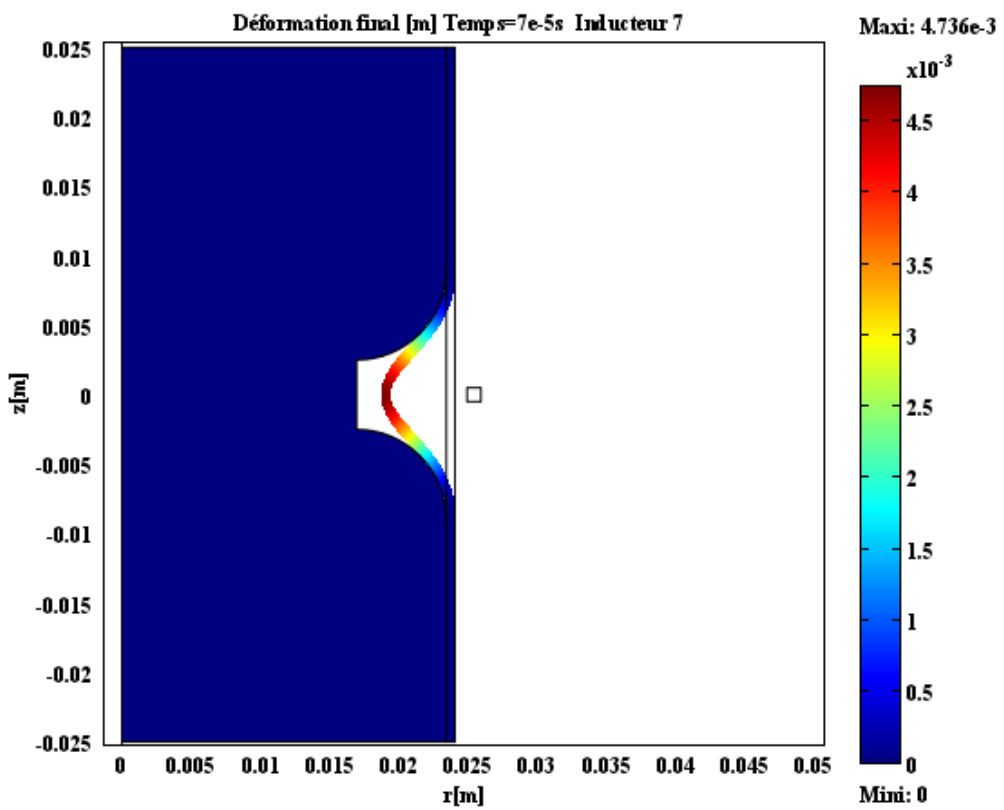
(c) Inducteur 4



(d) Inducteur 5

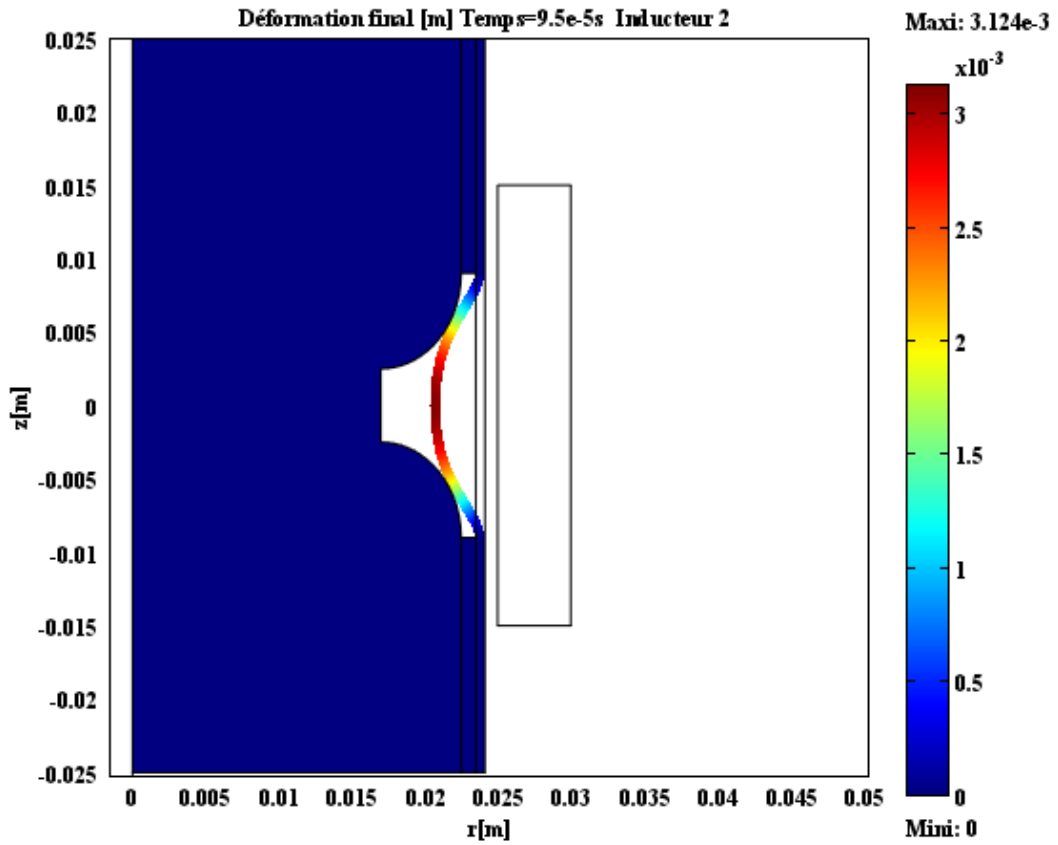


(e) Inducteur 6

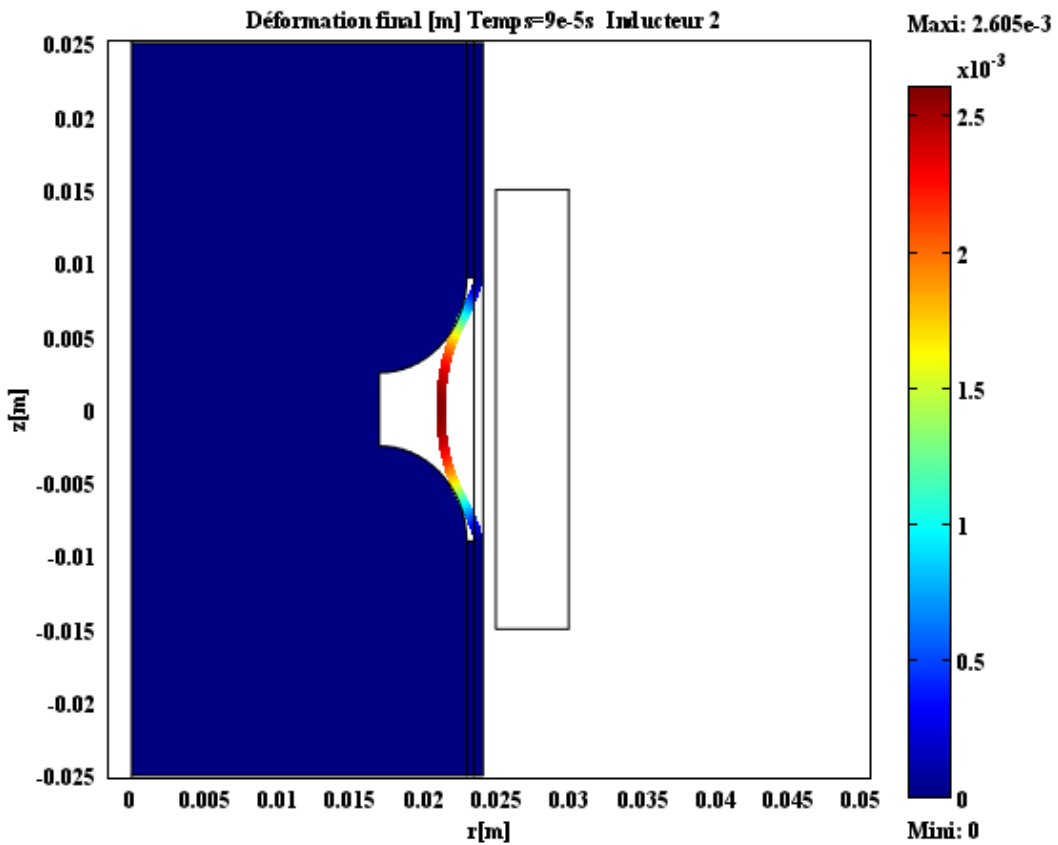


(f) Inducteur 7

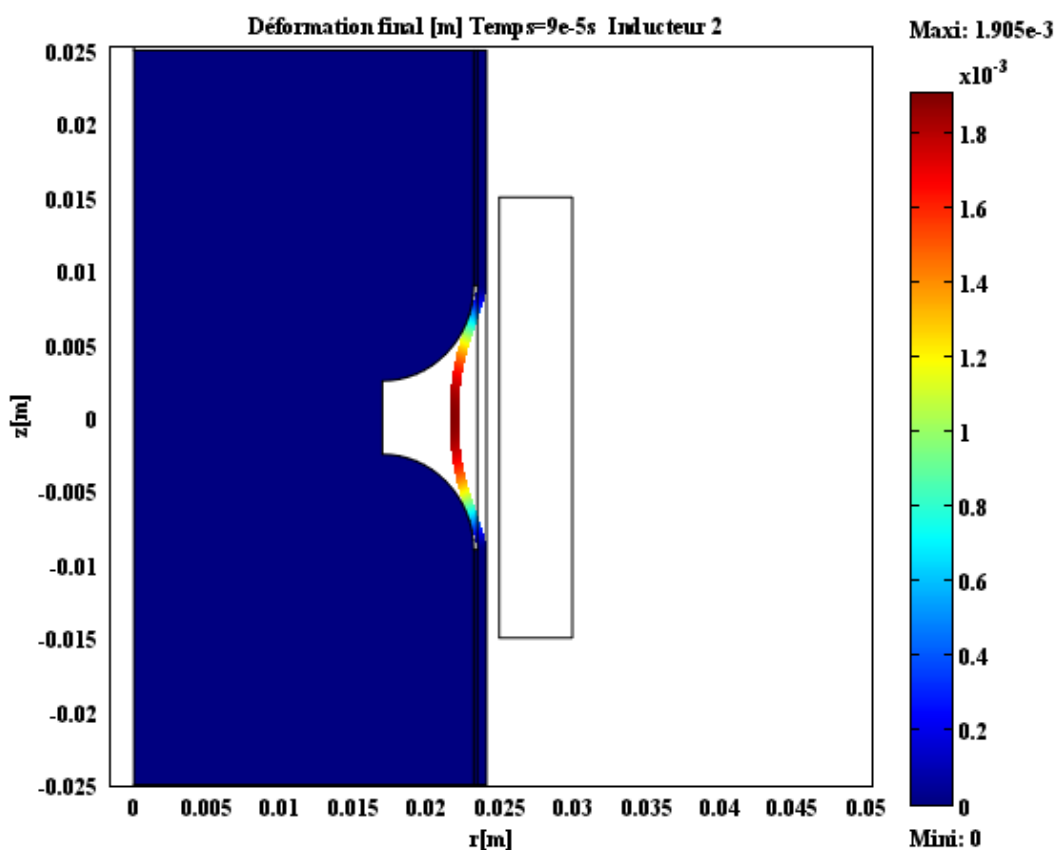
Figure III. 25: Déformation du tube avec différents inducteurs



(a) distance tube-matrice d=1mm



(b) distance tube-matrice d=0.5mm

(c) distance tube-matrice  $d=0.25\text{mm}$ **Figure III. 26: Déformation du tube avec différentes distances tube-matrice**

### III.10 Conclusion

Un modèle éléments finis 2D avec couplage fort des phénomènes magnétique et mécanique a été développé pour analyser en détail, la formabilité de tubes durant l'expansion et la compression sous pressions magnétiques et une analyse paramétrique détaillée a été menée. Les résultats de simulation sont en meilleur accord avec les résultats expérimentaux [30-32]. D'autre part, le FEM du tube vers l'intérieur d'une matrice a été aussi étudié numériquement. Différentes forces magnétiques ont été créées par différents inducteurs (de dimensions différentes) et ont engendré différentes formes finales de tubes comprimés contre une matrice. Les résultats numériques ont montrés que les dimensions de l'inducteur affectent fortement le niveau de compression du tube à l'intérieur de la matrice et par conséquent la formabilité et la forme finale des tubes. De plus, il a été bien vérifié que l'effet de la distance tube-matrice n'est pas négligeable. Les résultats de cette application industrielle sont aussi proches de ceux trouvés dans les travaux antérieurs [33].

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif général de ce travail était d'aborder la simulation du formage de tubes, par pression électromagnétique, en particulier la compression, l'expansion et la compression avec une matrice ayant une forme particulière. Pour cela, il était nécessaire de développer un outil numérique de simulation de formage de tubes par impulsion électromagnétique. En effet, la mise en pratique des dispositifs de magnétoformage est très coûteuse d'où la nécessité d'une modélisation et d'une simulation pour pouvoir prédire son comportement électromécanique.

Pour la modélisation du processus EMF, nous avons considéré une approche numérique à couplage fort liant les phénomènes multiphysiques (électromagnétiques et mécaniques) régissant le processus EMF.

Les résultats numériques sont comparés avec ceux trouvés expérimentalement, un accord satisfaisant a été obtenu. Pour analyser l'effet de certains paramètres géométriques et physiques mis en jeu dans ce procédé, des études paramétriques ont été réalisées. On en conclut que :

- La géométrie de l'inducteur et le courant de décharge ont un effet remarquable sur la déformation des tubes et le temps de déformation au cours de ces processus.
- Le formage électromagnétique double des tubes peut fournir une force électromagnétique pour deux tubes en même temps, et que les effets de compression et d'expansion peuvent être générés séparément.
- Dans une certaine mesure, le formage simultané des tubes doubles peut améliorer la faible efficacité du formage électromagnétique traditionnel à une seule tâche.
- A partir d'une analyse comparative des différents matériaux de tube nous pouvons affirmer que l'Aluminium est le matériau qui présente la meilleure formabilité dans ce processus.
- Pour avoir la forme exacte qu'on veut donner aux tubes, il est nécessaire d'utiliser des matrices, qui doivent être réalisées en un matériau résistant aux chocs.

Comme perspectives, nous pouvons proposer, pour travaux futurs, l'étude d'applications industrielles plus complexes pour l'expansion et compression de tubes. D'autre part, des études d'optimisation du procédé de FEM de tubes peuvent être abordées.

Finalement, des modèles 3D plus performants et fiables, seraient aussi intéressants.

## Bibliographie

- [1] [HTTPS://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9toformage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9toformage).
- [2] Muhammad Ali SIDDIQUI, « Numerical modelling and simulation of Electromagnetic Forming Process », Thèse de Doctorat, Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg, le 26 juin, 2009.
- [3] Hafsaoui Ilhem née Boutana, « Etude et modélisation numérique tridimensionnelle des effets mécaniques de champ électromagnétique », Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2008.
- [4] Oussama ZEGHAD, « Etude et Analyse du Processus de Formage par Champ Électromagnétique de Pièces Métalliques », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel, 2019.
- [5] L. Zernow, « Applications of High Velocity Metal Forming (HVMF) in Short Run Production », Creative Manufacturing Seminars, No. SP62-67, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Detroit, MI, 1962.
- [6] M. Noland, « Designing for the High-Velocity Metalworking Processes », Machine Design, Vol. 39, pp. 163-182, 1967.
- [7] Paul C. Miller, HERF « Update High Energy Rate Forming Joins the Productivity Race », Tooling & Production, Vol. 47, No. 7, pp. 90-97, 1981.
- [8] Maxwell, J.C., « A Treatise of Electricity and Magnetism », Macmillan and Co Publishers to the University of Oxford, 1873.
- [9] Kapitza, P.L., « A method for producing strong magnetic fields », Proceedings of the Royal Society Serine A 105, 691–710, 1924.
- [10] Harvey, G.W. and Brower, D.F. « Metal Forming Device and Method», US-Patent No. 2976907, 1958.
- [11] Meng Chen, Zhipeng Lai, Quanliang Cao, Xiaotao Han, Chen Wang, Ning Liu, Liang Li, « Improvement on formability and forming accuracy in electromagnetic forming of deep-cavity sheet metal part using a dual-coil system », University of Science and Technology, china, 2019.
- [12] R. Andersson, M. Syk « Electromagnetic Pulse Forming of Carbon Steel Sheet Metal », Swedish Tool & Die Technology, Luleå, Sweden, 2008.

- [13] X.H.Cui, J.H.Mo, J.J.Li, J.Zhao, Y.Zhu, L.Huang, Z.W.LiK Zhong, « Electromagnetic incremental forming EMIF », Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [14] M. Kleiner, C. Beerwald, W. Homberg, « Analysis of Process Parameters and Forming Mechanisms within the Electromagnetic Forming Process », CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54, pp. 225-228, 2005.
- [15] C. Rioux et F. Rioux-Damidau, « Énergétique du formage magnétique ». Revue de physique appliquée, CNRS Éditions, vol. 22, n° 4, p. 253-259, 1987
- [16] Rili Hicham, Kernou Samir, « Mise en forme d'un tube métallique par magnétoformage », Mémoire de Master en Electromécanique, Université Abderrahmane MIRA - Bejaia. 2014.
- [17] Boussole Mohammed El Amine, « Modélisation du comportement mécanique d'un système de formage électromagnétique », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel. 2014.
- [18] Hervé Galluzi, « Etude et Application des Champs magnétiques intenses au soudage d'éléments tubulaires En aciers inoxydables », Rapport cea-r-5355, Centra d'Etudes Nucléaires de Cadarache.
- [19] A-C. Jeanson, G. Avrillaud, et al. « Identification du comportement mécanique dynamique de tube d'aluminium par un essai d'expression électromagnétique », CSMA 2013 le colloque notionnel en calcul des structures, mai 2013.
- [20] A.Guglielmetti, « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique », thèse doctorat de l'université de technologie de Compiègne de Québec à Chicoutimi, 29 Juin 2012.
- [21] M. Zaouïa, « Modélisation numérique du couplage électromagnétique-mécanique dans les structures linéaires tubulaires », magister de l'EMP d'Alger, 05 Mai 2013.
- [22] Dj. Belfares et Y. Touati, « Modélisation électromagnétique et mécanique de l'expansion d'un tube par magnétoformage ». mémoire de fin d'étude de l'université de Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [23] Jin Jiaming, « The finite element method in electromagnetic ». John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [24] F. Rapetti, « Approximation des équations de la magnétodynamique en domaine tournant par la méthode des éléments avec joints ». thèse doctorat en spécialité mathématiques appliquées de l'université Paris 6, 29 Mai 2000.



- [25] Aurore. Guglielmetti, « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique », thèse doctorat université de technologie de Compiègne université du Québec à Chicoutimi, 29 juin 2012.
- [26] A-C. Jeanson, G. Avrillaud, et al, « Identification du comportement mécanique dynamique de tube d'aluminium par un essai d'expression électromagnétique », CSMA 2013 le colloque notionnel en calcul des structures, Mai 2013.
- [27] Abdenour Bahloul, Souhil Boukendir, « Etude et Modélisation de soudage des pièces Industrielles par impulsion magnétique », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel, 2019.
- [28] Abderrahmen BOUSBA, Yaaqoub NEDJARI BENHADJ ALI, « Etude et Modélisation d'Applications Industrielles du Formage Electromagnétique », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel, 2017.
- [29] W. Xiaolong, Y. Hui et L. Guangliang, « The Application of COMSOL Multiphysics in direct current method forward modeling », Xian International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines, Procedia Earth and Planetary Science 3, 266 – 272, 2011.
- [30] Xiaohui Cui & Jianhua Mo & Fei Han « 3D Multi-physics field simulation of electromagnetic tube forming », Int. J. Adv. Manuf. Technol, 59:521–529, 2012.
- [31] Suzuki H, Negishi H, Yokochi Y « Free expansion of tube under magnetic pressure », J. Jpn. Soc. Technol. Plast, 310 27:1254–1260, 1986.
- [32] ZHI LI, A. ABU-SIADA, (Senior Member, IEEE), HONGYU ZHU, CHENFEI JIANG 1, HANWEN NI, LI QIU, (Member, IEEE), AND HONGCHI LIU, « Study on the Efficiency of Simultaneous Tube Compression and Expansion Electromagnetic Forming ».
- [33] Hossein Ebrahimi Haratmeh, Lairize Fallahi Arezoodar, Mohmoud Farzin, « Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming », Int.J.Adv.Manuf.Technol, 88:1175–1185, 2017.

## Résumé

Le formage électromagnétique est une technologie de formage par impulsion ou à grande vitesse utilisant un champ magnétique pulsé pour appliquer les forces de Lorentz à des pièces de préférence constituées d'un matériau hautement conducteur de l'électricité, sans contact mécanique et sans milieu de travail. Ainsi des pièces tubulaires peuvent être comprimés ou expansés. Les modèles numériques développés sous environnement COMSOL sont destinés à étudier, analyser et prévoir le comportement des pièces de forme tubulaire, formées par impulsion magnétique. De plus, une analyse paramétrique a permis d'étudier l'effet des paramètres du processus sur la formabilité de tubes sous compression et expansion magnétiques libres ou avec matrices de formes spécifiques.

## Abstract

Electromagnetic forming is a pulse and high-speed forming technology using a pulsed magnetic field to apply Lorentz forces to workpieces made of highly electrically conductive material, without mechanical contact and no working medium. Thus, tubular pieces can be compressed or expanded. The numerical models developed with COMSOL environment are intended to study, analyze and predict the behavior of tubular parts formed by magnetic impulses. In addition, parametric analysis made it possible to study the effect of process parameters on the formability of tubes under free magnetic compression and expansion or with matrices of specific shapes.

## ملخص

تشكيل الكهرومغناطيسي عبارة عن تقنية تشكيل نبضي أو عالي السرعة تستخدم مجالاً مغناطيسياً نابضاً لتطبيق القوى الكهرومغناطيسية على أجزاء مصنوعة من مادة عالية التوصيل للكهرباء، دون اتصال ميكانيكي وبدون بيئة عمل. وبالتالي، يمكن ضغط القطع الأنبوبية أو توسيعها. تهدف النماذج الرقمية المطورة في بيئة COMSOL إلى دراسة وتحليل والتنبؤ بسلوك الأجزاء الأنبوبية المكونة من النبضات المغناطيسية. بالإضافة إلى ذلك، أتاحت التحليلات البارامترية دراسة تأثير معلمات العملية على قابلية تشكيل الأنابيب تحت ضغط وتمدد مغناطيسي مجاني أو مع مصفوفات من أشكال محددة.

**Mots clés:** FEM, PEM, formage électromagnétique