

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*



*UNIVERSITE Mohamed Seddik Ben Yahia*  
*JIJEL*



*Département d'électrotechnique*

# PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Filière : **Électrotechnique**

Option : *Electromécanique*

جامعة جيجل  
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا  
رقم المجلد .....  
MR549



## Thème

**ETUDE DE LA MISE EN FORME DE PIECES  
INDUSTRIELLES PAR LE CHAMP  
ELECTROMAGNETIQUE**

Présenté par :

Amin SOUILAH

Adel LADJEROUD

Encadré par :

Dr. Ilhem HAFSAOUI

∞ Promotion 2016 ∞

## **Remerciements :**

*Nous tenons d'abord à exprimer notre reconnaissance à Madame Hafsaoui d'avoir accepté de diriger ce travail. Qu'elle soit vivement remerciée pour la confiance qu'elle nous a témoignée, en répondant favorablement et sans hésitation à notre sollicitation, pour sa modestie, son aide précieuse et les conseils qu'elle nous a prodigués.*

*Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.*

*Nous exprimons aussi notre profonde gratitude et notre reconnaissance à nos familles et amis qui nous ont soutenus dans les bons moments aussi bien que les mauvais*

*À tous ceux qui se sont enquis de près ou de loin de l'avancée de ce travail.*

*ADEL,*

*AMIN*

## *Dédicace*

*À la mémoire de ma mère,  
Requiescat in pace*

*ADEL.*

*A mes très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite,  
pour leurs encouragements. Que dieu les garde éternellement heureux  
à mes chers frères.*

*A toute la famille « souilah »*

*A tous mes amis et mes collègues, et à tous ceux qui*

*M'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

*AMIN.*

## Sommaires

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### Chapitre I

#### *Aspects théoriques et industriels du formage électromagnétique*

I-1 Introduction .....	3
I-2 Méthodes de formage à grande vitesse .....	4
I 2-1 Formages électro hydrauliques .....	4
I-2-2 Formage explosif .....	5
I-2-3 Formage électromagnétique .....	7
I-3 Technologie des installations de FEM .....	8
I- 3-1 Installations du FEM .....	8
I-3-1-1 Générateurs .....	9
I-3-1-2 Bobine .....	10
I-3-1-3 Caractéristiques nécessaires de bobinage FEM.....	11
I-3-1-4 Conformateur de champ.....	12
I-3-1-5 Matrice .....	13
I-3-2 Applications de FEM .....	13
I-3-2-1 Assemblage .....	13
I-3-2-2 Soudage .....	15
I-3-2-3 Formage .....	15
I-3-3 Influence des divers paramètres sur la déformation .....	17
I-4 Applications industrielles .....	17
I-5 Avantages et inconvénients du procédé FEM.....	19
I-5-1 Avantages .....	19
I-5-2 Inconvénients.....	19
I-6 Conclusion .....	20

### Chapitre II

#### *Modèle mathématique*

II.1 Introduction.....	21
II.2 Phénomènes électromagnétiques .....	21

II.2.1 Equations de Maxwell .....	21
II.2.2 Lois de comportement du milieu.....	22
II.2.3 Conditions de passage .....	23
II.2.4 Forces électromagnétiques .....	24
II.2.5 Équation électromagnétique .....	25
II.2.6 Calcul des courants induit .....	25
II.2.7 Effet de peau .....	25
II .3 Phénomènes mécaniques .....	26
II.2.1 Équation d'équilibre .....	26
II.2.2 Relation déformation-déplacement .....	26
II.2.3 Relation contrainte-déformation. ....	27
II.2.4 Symétrie axiale .....	30
II.4. Formulation numériques.....	31
II.5.1 Méthode des éléments finis .....	31
II.5 Couplage .....	31
II.5.1 Couplage faible.....	31
II.5.2 Couplage fort.....	32
II.5.3 Termes de couplage.....	32
II.6. Présentation du logiciel COMSOL .....	33
II.7 Conclusion .....	33

### *Chapitre III*

#### *Application et résultats*

III.1 Introduction.....	34
III.2. 1 <sup>ère</sup> application : Emboutissage de plaques.....	34
III.2.1. Comportement de la plaque lors de l'emboutissage.....	37
III.2.2. Effet du nombre de spires.....	38
III.2.3. Effet de la distance entre l'inducteur et la plaque.....	40
III.2.4. Effet de l'épaisseur de la plaque .....	41
III.2.5. Effet de la nature du matériau de la pièce.....	43
III.2.6. Effet de la forme de la bobine.....	45

III.3. 2 <sup>eme</sup> application : Fléchissement avec inducteur massif .....	47
III.4. Cas d'une rupture de la plaque.....	49
III.5. Compression de tubes.....	51
III.5.1 Inducteur massif.....	51
III.5.2 Avec concentrateur.....	53
III.6 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56

## Liste des figures

Fig. I.1 : Système de formage hydraulique (a) formage des tubes (b) formage des plaques .....	5
Fig. I.2 : Exemple de pièces produites par formage électrohydraulique .....	5
Fig.I.3 : Formage par explosion : schéma et installation.....	6
Fig. I.4 : Schéma représentatif du processus de la FEM .....	7
Fig. I.5 : Exemple des pièces produites par formage électromagnétique .....	8
Fig. I.6 : le générateur de FEM .....	9
Fig. I.7 : bobine de placage .....	10
Fig. I.8 : Bobine d'expansion .....	10
Fig. I.9 : Bobine de compression .....	11
Fig I.10: courants induit de surface .....	12
Fig I.11 : Concentrateur pour compression.....	12
Fig. I.12 : Image de la matrice et de l'inducteur dans le cadre d'une application industrielle .....	13
Fig. I. 13 : Exemple d'assemblage des pièces par impulsion magnétique .....	14
Fig. I.14 : Soudure de tubes en aluminium à des tubes en cuivre .....	15
Fig. I.15: (a) compression de tube (b) et (c) Expansion de tube (d) Placage de pièces plates.....	15
Fig. I.16 : Exemples de pièces formées par impulsion magnétique .....	16
Fig. I.17 Exemples d'applications industrielles du formage magnétique .....	18
Fig. III.1 : Système d'emboutissage.....	34
Fig.III.2 : courant décharge du système d'emboutissage (premier cas).....	36
Fig.III.3 : courant décharge du système d'emboutissage de plaque (deuxième cas).....	36
Fig.III.4 : Contribution de la force de Lorentz maximale.....	37
Fig.III.5 : Déplacement total à $t=300 \mu s$ .....	38
Fig.III.6: Déplacement total pour différents nombre de spires de la bobine.....	39
Fig.III.7 : contribution de la force de Lorentz pour différents inducteurs.....	39
Fig.III.8: Déplacement total pour différentes distances bobine-pièce.....	40
Fig.III.9 : contribution de la force de Lorentz pour différentes distance entre la pièce et l'inducteur .....	41
Fig. III.10 : Déplacement total pour différentes épaisseurs de la pièce.....	42

Fig.III.11 : Forces de Lorentz le long de la plaque pour différents épaisseurs .....	42
Fig.III.12 : Densité de courant induite maximal dans les différentes plaques .....	44
Fig.III.13 : Forces de Lorentz le long des plaques avec différents matériaux.....	44
Fig.III.14 : Déplacement total à $t= 300 \mu s$ pour différents matériaux.....	45
Fig.III.15 : Forces de Lorentz créées par différentes bobines.....	46
Fig.III.16 : Emboutissage de plaques par bobines carrée, rectangulaire et circulaire.....	46
Fig.III.17: Système de fléchissement.....	47
Fig.III.18 : Forces de Lorentz dans le cas de fléchissement .....	48
Fig.III.19: Fléchissement de la plaque.....	48
Fig.III.20 : Système d'emboutissage avec rupture.....	49
Fig.III.21 : Déformation de la plaque avec rupture.....	50
Fig.III.22 : Contrainte de Tresca au point d'instabilité .....	50
Fig.III.23: Système de compression avec inducteur massif.....	51
Fig.III.24 : Compression du tube dans trois temps différents.....	52
Fig.III.25: Contribution de la force de Lorentz.....	53
Fig.III.26 : Système de compression avec conformateur du champ.....	54
Fig. III.27 Densité de flux magnétique .....	54
Fig.III.28 : Contribution de la force de Lorentz .....	55



# Introduction

## Général

## Introduction générale :

Le formage est de donner une forme ou un modèle, de prendre une forme définitive. Avec les premiers pas de l'homme sur terre, il a toujours formé des éléments et matériaux, d'une manière ou d'une autre pour son profit pour former un matériau, quelques équipements sont habituellement nécessaires [1].

Les techniques de formage à grande vitesse peuvent être pratiquement utilisées dans le formage des métaux et cela ajoute de la flexibilité au processus. Les opérations de formage à grande vitesse sont considérées comme des opérations où les vitesses de pièce à former dépassent typiquement 100m/s. Les techniques à grande vitesse fournissent des méthodes robustes pour accomplir le formage des métaux qui est assez difficile de manière classique.

Cependant, vue l'efficacité de ces méthodes la simplicité et la rapidité des systèmes de fabrication, un intérêt particulier des industriels s'est tourné vers ces méthodes à grande vitesse celle-ci sont basées principalement sur la source d'énergie utilisée pour obtenir de grandes vitesses. Les plus courantes sont : le formage explosif, le formage électrohydraulique et le formage électromagnétique.

Le formage électromagnétique est une méthode moderne de réalisation des différentes pièces industrielles.

En effet, la présence des courants induits et d'un champ magnétique engendre des forces électromagnétiques qui développent soit des déplacements, soit des vibrations ou des déformations de la structure sur laquelle elles s'exercent. Le calcul de ces courants induits constitue une partie fondamentale de l'analyse des phénomènes électromagnétiques. Si au début les problèmes traités étaient réduits à une forme simple pour permettre d'obtenir une solution analytique, l'évolution des moyens informatiques et les méthodes numériques ont permis de se rapprocher des phénomènes réels et d'élargir la variété des problèmes susceptibles d'être résolus [2], [3].

Les premiers jours de formage électromagnétique ont montré une utilisation commerciale limitée par Général Dynamics, NASA et Boeing. De nos jours le magnétoformage fait l'objet de plusieurs investigations, il est utilisé de plus en plus dans les industries d'automobiles: BMW, Volkswagen, BMAX.

Jusqu'alors, le magnétoformage est resté essentiellement expérimental. Il a cependant, vu son développement relancé par l'utilisation de plus en plus soutenue de l'aluminium, notamment dans l'industrie automobile. Dans ce cadre, la simulation numérique devrait lui faire bénéficier d'un regain d'intérêt important et pourrait participer à faciliter son expansion.

Le but de notre travail est donc de mettre en place des modèles numériques, intégrant un couplage fort électromagnétique mécanique, afin de simuler des systèmes de formage magnétique, d'étudier et d'analyser le comportement aussi bien électromagnétique que mécanique des pièces déformées par ce processus.

Notre travail se démarque des précédents sur le choix de systèmes de formage par impulsion magnétique purement industriels, focalisation sur des études paramétriques pour analyser l'effet de différents facteurs des installations de FEM et déterminer les paramètres prépondérants de ce procédé.

D'autre part, la comparaison des résultats expérimentaux et ceux obtenus par notre modélisation permet de conclure que ces derniers sont en bonne concordance.

Dans le but de présenter ce travail on a divisé ce mémoire en trois chapitres.

En premier lieu, les aspects théoriques et industriels du magnétoformage sont présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles mathématiques qui régissent les phénomènes mis en jeu lors du processus : les phénomènes électromagnétiques, mécaniques.

Dans le troisième chapitre, nous analysons les résultats des différentes applications simulées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.





# Chapitre I

## I-1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du formage par impulsion magnétique, qui permet une mise en forme des matériaux métalliques à grandes vitesses de déformation. Ce type de procédé permet 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 froissements donc de limiter le retour élastique. Aussi, ce type de procédé présente un intérêt industriel certain pour la réduction de poids et pour la conception de pièces à géométrie complexe ou d'assemblages multi-matériaux [4].

Ce procédé est utilisé pour le formage de tôles ou de tubes métalliques électriquement conducteurs. Il repose sur la décharge rapide de forts courants dans un inducteur (bobine) placé à proximité de la pièce à former. Le couplage entre le champ magnétique créé par l'inducteur, et le courant induit dans la pièce, par les variations de ce même champ magnétique, génère des forces de Lorentz, qui, si elles sont suffisamment importantes, permettent la mise en forme des pièces.

Ce procédé de magnétoformage MF prend généralement place dans une matrice (un moule). La mise au point des procédés de MF est souvent complexe à réaliser, en particulier, du fait des nombreux couplages multi physiques impliqués dans le procédé. Cela nécessite de s'appuyer sur une démarche de modélisation numérique, requérant une description précise du comportement des matériaux mis en jeu.

Un des principaux enjeux est alors de déterminer au mieux le comportement des matériaux lors de sollicitations dynamiques. En effet, la durée d'une opération de magnétoformage est de l'ordre d'une centaine de microsecondes, les vitesses de déformation associées pouvant aller de 100 à 10 000 m.s<sup>-1</sup>. Le comportement mécanique peut alors être modifié et s'éloigner du comportement observé sous sollicitations quasi-statiques [5]

Pour réaliser une opération de MF, il est nécessaire d'avoir un générateur de courant (composé de plusieurs capacités), une bobine, une pièce à déformer (soit sous la forme d'une tôle ou d'un tube) et éventuellement, une matrice sur laquelle viendra se plaquer la pièce à déformer.

Afin de modéliser le MF, nous allons décrire brièvement les différents phénomènes physiques qui se déroulent lors de ce procédé. Dans un premier temps, un courant de forte intensité, produit par le générateur, traverse la bobine. Celle-ci génère alors un champ électromagnétique dans la région de l'espace situé entre la bobine et la pièce. Un courant induit

se propage ensuite dans la pièce à déformer. Ce courant induit génère à son tour un champ magnétique qui s'oppose à celui généré par la bobine. En conséquence, il se développe de grandes forces de répulsion entre la bobine et la pièce. Ces forces de répulsions, appelées forces de Lorentz, projettent la pièce à une grande vitesse (aux environs d'une centaine de mètre par seconde). Lorsqu'une matrice est utilisée, la pièce vient se plaquer contre celle-ci, et prend ainsi la forme désirée. En l'absence de matrice la pièce se déforme librement.

Dans tous les cas, la forme finale de la pièce dépend de plusieurs paramètres tels que la conductivité électrique de la pièce, le courant de décharge, la distance entre la bobine et la pièce.

## **I-2 Méthodes de formage à grande vitesse**

### **I-2-1 Formage électro hydraulique**

Le formage électro hydraulique, est un procédé de mise en forme des métaux par décharges électriques dans un liquide utilisant les mêmes générateurs d'impulsions. Les bobines de champ magnétique sont remplacées par des électrodes entre lesquelles la décharge s'effectue ; les électrodes sont placées dans une cuve de formage contenant le liquide transmetteur et la pièce à mettre en forme sur sa matrice. Lors d'une décharge électrique de haute intensité dans un liquide, il se produit un ensemble de phénomènes physico-chimiques complexes dans l'espace inter électrodes : ionisation et dissociation des molécules dans la ligne de courant et ses environs ; formation de puissantes ondes de choc ; émission de rayonnements et d'ultrasons ; pulsation d'une bulle de vapeur et phénomènes de cavitation ; apparition de champs magnétiques impulsionnels. Seules les ondes de choc et la pulsation de la bulle de vapeur contribuent à la déformation de la pièce.

La durée totale de la décharge est de 100 à 300  $\mu$ s suivant les caractéristiques électriques du circuit (capacité, tension, inductance) et les vitesses de déformation correspondantes sont du même ordre de grandeur que celles atteintes en formage électromagnétique.

Par contre, le rendement énergétique d'une installation électro hydraulique est nettement meilleur que celui d'une installation de formage électromagnétique, pour une déformation identique en placage, l'énergie à mettre en jeu est environ deux fois moins importante en formage électro hydraulique qu'en formage électromagnétique.

Ainsi, il est possible de mettre en forme des pièces de dimensions plus importantes, en particulier, la conductivité du matériau n'ayant plus d'influence, le formage électro hydraulique se prête bien à la déformation de l'acier [5].

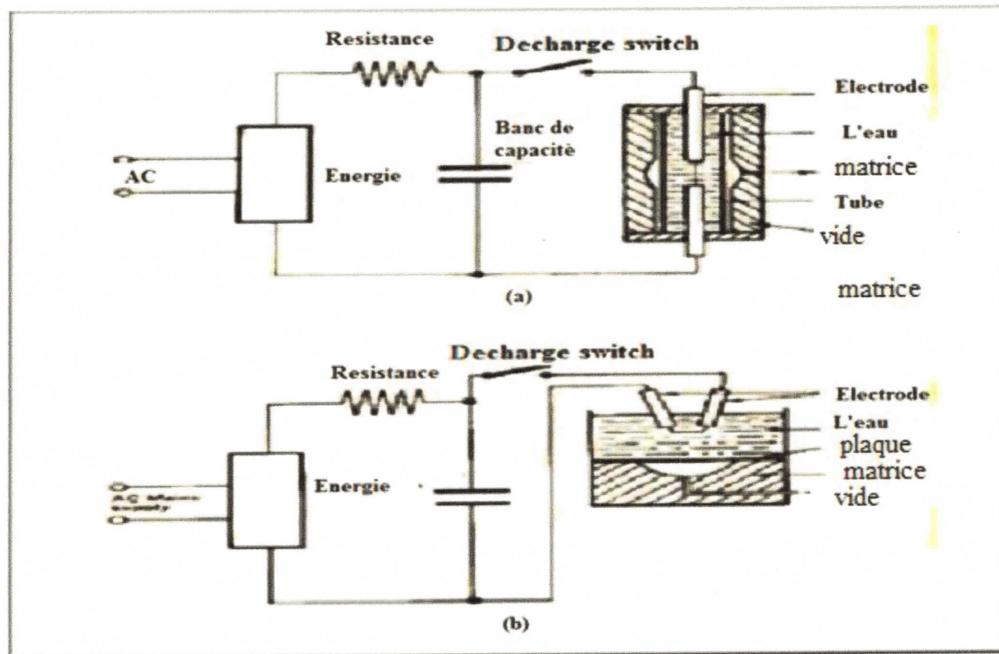


Fig. I.1 : Système de formage hydraulique (a) formage des tubes (b) formage des plaques [6]

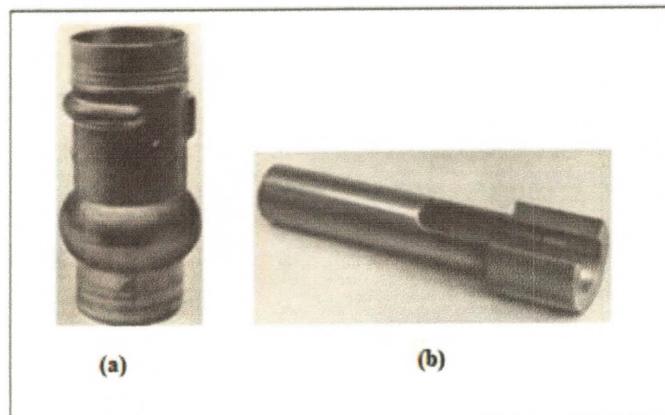


Fig. I.2 : Exemples de pièces produites par formage électro hydraulique (a) partie bombée, (b) partie crêpé [6]

### I-2-2 Formage explosif

Dans ce processus, l'énergie libérée, due à la détonation d'un explosif, est utilisée pour former la configuration désirée. La charge utilisée est très faible, mais elle est capable d'exercer d'énormes forces sur la pièce à former. Le formage explosif a été reconnu comme une méthode de formage des métaux depuis plus de 100ans [1].

Les progrès techniques importants réalisés ces dernières années dans diverses branches de l'industrie, en particulier dans les industries spatiales et nucléaires, nécessitent, de manière parfois conjointe, des matériaux nouveaux et des formes complexes. Les propriétés mécaniques ainsi recherchées sont, dans beaucoup de cas, peu ou pas compatibles avec les procédés de mise en forme classiques.

Cette technique, d'application industrielle relativement récente, repose sur une grande part de savoir-faire. Cela s'explique par un usage encore marginal qui ne justifie pas la mise en œuvre de recherches nécessairement onéreuses, ne serait-ce que par la prise en compte de l'aspect sécurité. [7]

La nature du formage par explosion et la cinétique du déplacement des particules du métal sont très compliquées. Pendant la détonation de la charge explosive brisante, celle-ci se transforme en gaz à l'arrière du front de réaction qui est nommé « onde de détonation ». L'onde de choc et le flux hydraulique qui l'accompagne transfèrent leur énergie à une ébauche à déformer, laquelle commence à se déplacer vers la matrice avec une vitesse de 40 à 120m/s (fig. I.3). Une onde réfléchie est créée et se déplace en sens inverse. Grâce à la cavitation, le temps de l'action du chargement sur le brut dépasse considérablement le temps d'action de l'onde de choc et, par conséquent, le chargement est non monotone.

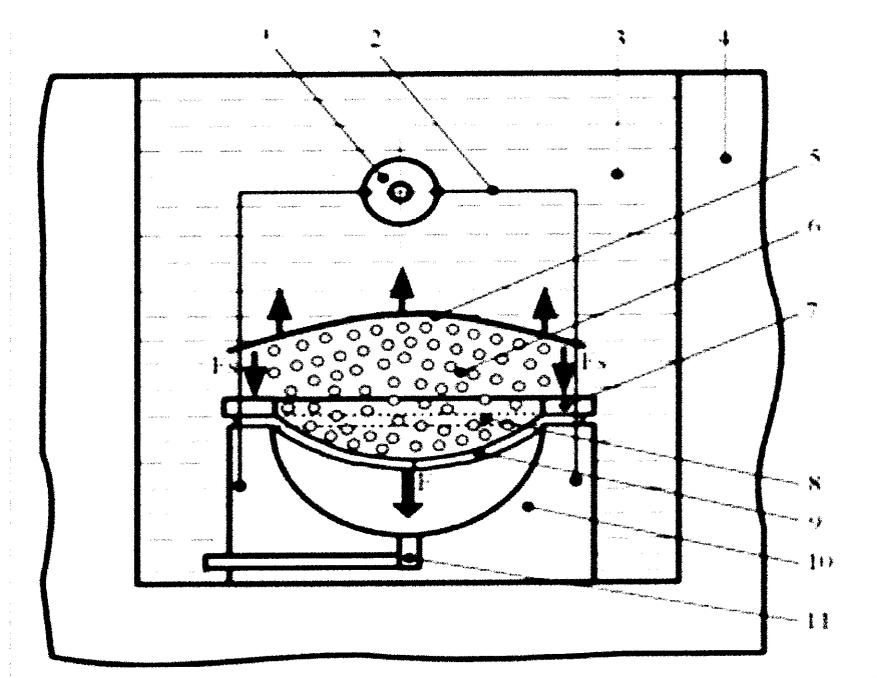


Fig.I.3 : Formage par explosion : schéma et installation.

Avec :

1=charge explosive avec electro-detonateur ; 2=système de maintien de charge explosive ; 3=eau ; 4=chambre de protection à parois épaisses ; 5=onde réfléchie ; 6=region de cavitation avec plusieurs boules ; 7= anneau de serrage ; 8=plaque initiale ; 9=ébauche dans un état de déformation ; 10=matrice ; 11=prise de vide ; F=force ; Fs=effort de serrage.

### I-2-3 Formage électromagnétique

Le formage électromagnétique est une technique à grande vitesse, qui utilise la force de répulsion électromagnétique générée par une décharge électrique pour former des pièces comme des plaques ou des tubes métalliques. [1]

Afin de comprendre cette technique, on propose de parler de trois aspects différents du formage électromagnétique, le mécanisme du FEM, son processus et ses opérations typiques.

Le mécanisme du formage électromagnétique n'est pas complexe comme il paraît. Il est basé sur la force de Lorentz, qui est une force électromagnétique causée par l'interaction entre les champs magnétiques de deux courants traversant les conducteurs.

Pour réaliser le processus de formage électromagnétique l'équipement nécessaire consiste d'un banc de capacité qui emmagasine l'énergie électrique, un circuit de charge pour fournir l'énergie au banc de capacité, un circuit de décharge, un inducteur et une pièce à déformer et parfois une matrice pour donner une forme bien déterminée à la pièce.

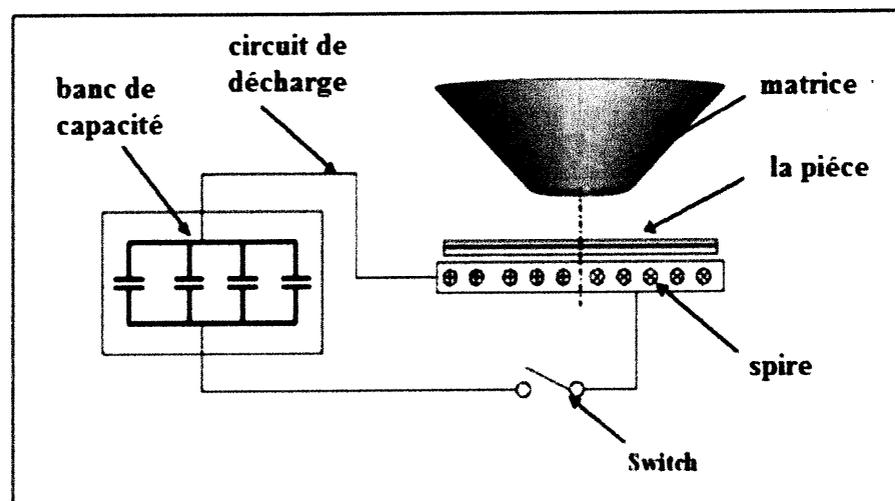


Fig. I.4 : Schéma représentatif du processus de la FEM [8]

L'une des caractéristiques importantes du formage électromagnétique, est que la pièce doit être suffisamment conductrice. Ainsi, l'efficacité du formage électromagnétique est directement liée à la résistance du matériau de la pièce. Les matériaux avec faible conductivité ne peuvent être effectivement formés que si une pièce auxiliaire de grande conductivité est utilisée pour pousser la pièce à être formée.

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

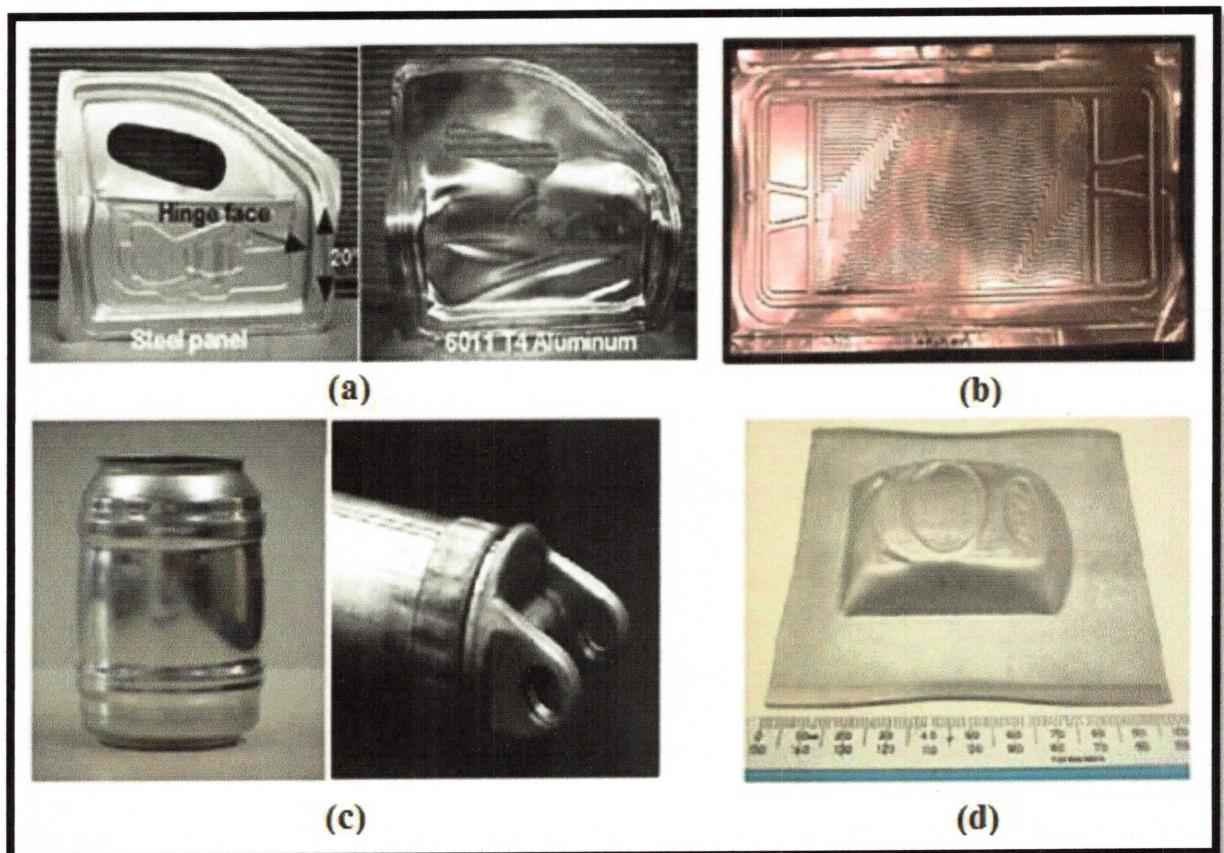


Fig. I.5 : Exemples de pièces produites par formage électromagnétique : (a) Industrie automobile, (b) Panneau d'une pile à combustible, (c) Emballage de l'industrie, (c) Cellulaire du téléphone [8]

### I-3 Technologie des installations de FEM

#### I-3-1 Installations du FEM

Une installation FEM est constituée en général :

- Un générateur constitué de plusieurs condensateurs (batterie de condensateurs) qui stocke l'énergie électrique. La batterie de condensateurs fournit de l'énergie électrique à la bobine.
- Une bobine dont la géométrie dépend de l'opération de formage et capable de supporter ce courant et les efforts magnétiques résultants.
- Une matrice qui forme le matériau dans la forme désirée.
- Une pièce (feuille ou tube) à déformer, matériau conducteur comme l'Aluminium, Laiton, l'argent, etc.

**I- 3-1-1 Générateurs**

Ce sont des machines capables de délivrer des impulsions électriques de plusieurs centaines de kilo ampères sous des tensions de plusieurs kilovolts et d'une durée supérieure à une centaine de microsecondes, avec des cadences de production industrielle. Ces impulsions électriques sont obtenues par la décharge de condensateur [1].

Les condensateurs du générateur d'impulsion sont au préalable chargés. Puis Un interrupteur de haut courant est fermé permettant ainsi aux condensateurs de se décharger sinusoïdalement ce qui crée un courant alternatif dans la bobine. L'ensemble de condensateurs avec un interrupteur s'appelle un module [9]. L'énergie d'un module augmente avec le voltage puisqu'elle obéit à l'équation :

$$E = \frac{1}{2} V^2 C \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec :

V : la tension de charge

C : capacité de la batterie de condensateur

Un générateur est composé d'un circuit de commande qui délivre une tension primaire augmentant progressivement jusqu'à la valeur désirée. 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 de champ que l'on adopte définit la fréquence d'oscillation et le courant dans le circuit.



Fig. I.6 : Générateur de FEM [8]

### I-3-1-2 Bobine

En magnétoformage, la bobine de champ joue un rôle primordial: d'une part, elle transforme les impulsions électriques, dues à la décharge de la batterie de condensateurs, en un champ magnétique intense et d'autre part, en supportant les efforts magnétiques intenses, elle permet la mise en forme des métaux sans se déformer. Suivant le genre de l'opération de formage, trois types de bobines sont utilisés :

- i) la bobine plate utilisée en formage des tôles métalliques (fig. I.7).
- ii) la bobine hélicoïdale utilisée pour l'expansion des tubes (fig. I.8).
- iii) la bobine de compression : semblable à celle d'expansion cependant, elle entoure le tube à comprimer (fig. I.9).



Fig. I.7 : bobine de placage [10]





Fig. I.8 : Bobine d'expansion [10]



Fig. I.9 : Bobine de compression [10]

### I- 3-1-3 Caractéristiques nécessaires de bobinage FEM

Le système électromagnétique est équivalent à une mise en série d'une résistance  $R$  d'une inductance  $L$ . Lorsqu'une batterie de condensateurs, chargés d'une importante quantité d'électricité, se décharge à travers ce système, le courant délivré est variable au court du temps.

La décharge des condensateurs à travers le circuit est décrite par l'équation différentielle (I.1), si le condensateur est chargé sous une tension  $V_0$ , le courant de décharge est sinusoïdalement amorti et s'écrit comme suit :

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

Avec :

$V_0$  : Tension du générateur.

$$\xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{et} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

### I-3-1-4 Conformateur de champ

Le conformateur (ou concentrateur) de champ constitue un outil séduisant qui est apparu au cours des années 60. Il est souvent utilisé dans le cas de la compression .il s'agit d'un cylindre conducteur évidé, de dimensions intérieures adaptées à celles de la pièce à déformer et de diamètre glissant juste dans le diamètre intérieur de la bobine de compression [11].

La présence d'un concentrateur de courant à l'intérieur de la bobine permet comme son nom l'indique de concentrer le courant sur une surface- plus petite et ainsi le champ magnétique à l'intérieur de l'inducteur est plus élevé et donc la pression magnétique sur le tube plus importante. De plus, en l'absence de concentrateur de courant, la bobine, trop petite, explose, ce qui empêche toute production industrielle, mais aussi cause des soucis à l'expérimentation. Le concentrateur de courant est aussi placé entre l'inducteur et les tubes à souder [9].

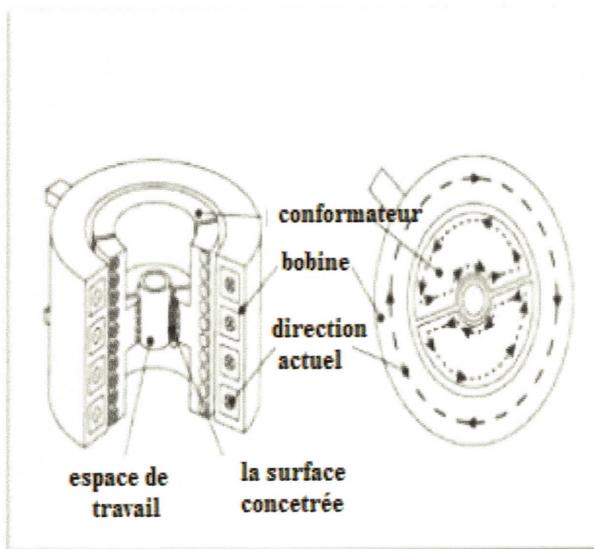


Fig. I.10: courants induits de surface

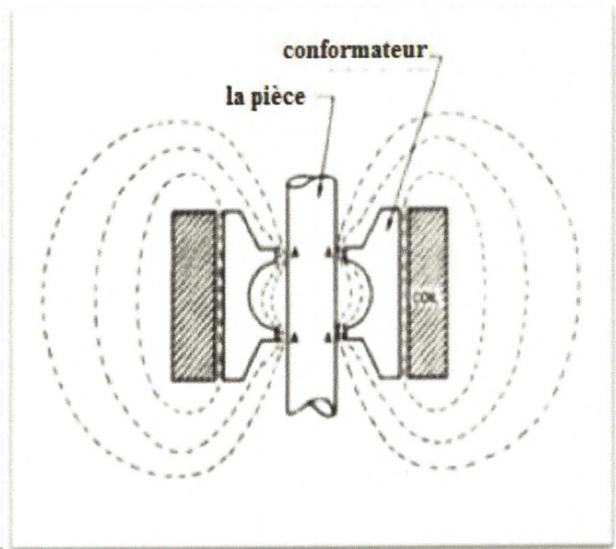


Fig. I.11 : Concentrateur pour compression.

### I- 3-1-5 Matrice

A partir de la pression magnétique, on ne peut guère assurer la forme exacte à donner à la pièce, tout au plus, pourra -telle être accentuée la ou la déformation doit être maximum. Il peut même arriver, surtout dans le cas des faibles épaisseurs de métal, que les forces parasites dues aux imperfections du champ ou aux interactions entre différents points de la pièce conduisent à des instabilités ou à des déformations néfastes.

Par conséquent, la forme à obtenir sera déterminée par une matrice contre laquelle la pièce vient se plaquer. Lorsque celle-ci entre en contact avec la matrice, elle y perd vitesse et énergie cinétique.

La principale qualité demandée au matériau, qui constitue la matrice, est une grande résilience aux chocs (capacité à absorber des chocs mécaniques d'énergie élevée). On pourra choisir par exemple, des plastiques tels que le polyuréthane de forte densité, ou bien une matrice de caoutchouc gonflable, permettant ainsi le formage et le démoulage de pièce complexes, ou encore du bois [12] [13].

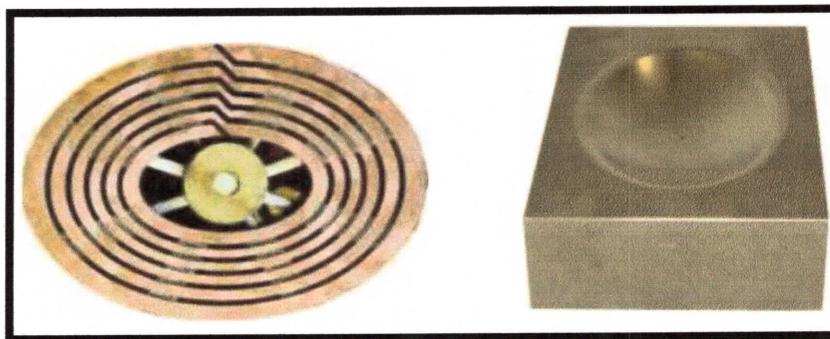


Fig. I.12 : Image de la matrice et de l'inducteur dans le cadre d'une application industrielle [10]

### I-3-2 Applications du FEM

#### I-3-2-1 Assemblage

La Technologie par Impulsion Magnétique est un procédé innovant pour mettre en mouvement des pièces à haute vitesse qui permet de faire de la déformation et de l'assemblage.

Il est destiné à assembler deux ou plusieurs matériaux (qui forme un composite) qui sont sertis en compression ou en expansion, par exemple, pour l'assemblage de produits plats ou tubulaires. C'est aussi un moyen d'assemblage pour l'étanchéité entre deux pièces.

Les principaux avantages d'assemblage sont :

- **Economique** : Le brasage est rapide, précis et contrôlable. Il réduit les coûts de rejet. Il est précis répétitif, et donc parfaitement adapté aux méthodes de production automatisées. Le brasage facilite d'autre part, la production rapide de pièces de composants standards, donc plus économique que de produire des unités individuelles entièrement neuves.
- **Flexible** : Le brasage est un procédé extrêmement polyvalent. Il permet de souder une large gamme de métaux qu'ils soient ferreux ou non ferreux. et comme le brasage ne fait pas fondre le métal de base, il est idéal pour souder les métaux ayant différentes températures de fusion.
- **Net et robuste** : Résistent aux chocs et aux vibrations, sont à l'épreuve des fuites et conducteurs d'électricité. Un assemblage brasé typique est aussi solide sinon plus que les métaux de base qu'il soude [14].



Fig. I. 13 : Exemple d'assemblage des pièces par impulsion magnétique [14]

### I-3-2-2 Soudage

Le soudage par impulsion magnétique appartient au groupe des procédés de soudage par pression permettant de réaliser un assemblage entre deux surfaces en les pressant l'une contre l'autre, comme l'aluminium sur le cuivre (figure. I.14).

Le principe du soudage par impulsion magnétique est semblable à celui du soudage par explosion. C'est un procédé par pression où la déformation se fait très rapidement mais les forces de soudage sont les forces électromagnétiques qui à leur tour sont générées par une bobine.

Quoique la méthode soit relativement jeune, des applications industrielles ont été déjà mise en place. La recherche se dirige maintenant vers l'assemblage de matériaux difficilement soudables et vers des assemblages hétérogènes. Cette méthode de soudage ne fait pas usage de chaleur de telle sorte que des matériaux à point de fusion très différents peuvent être assemblés avec cette technique de soudage. De plus, le procédé possède un potentiel réel pour la réalisation rapide et économique de ces assemblages.

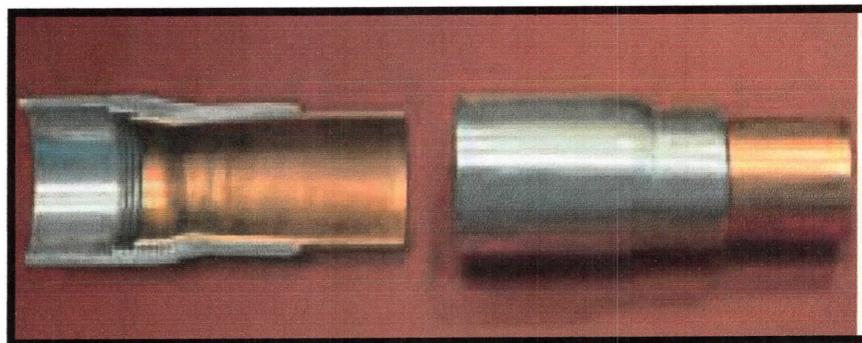


Fig. I.14 : Soudage de tubes en Aluminium à des tubes en cuivre [15]

### I-3-2-3 Formage

Lors du formage par impulsion magnétique, les champs magnétiques sont utilisés pour réformer ou perforer des produits plats ou tubulaires suivant la forme d'une matrice.

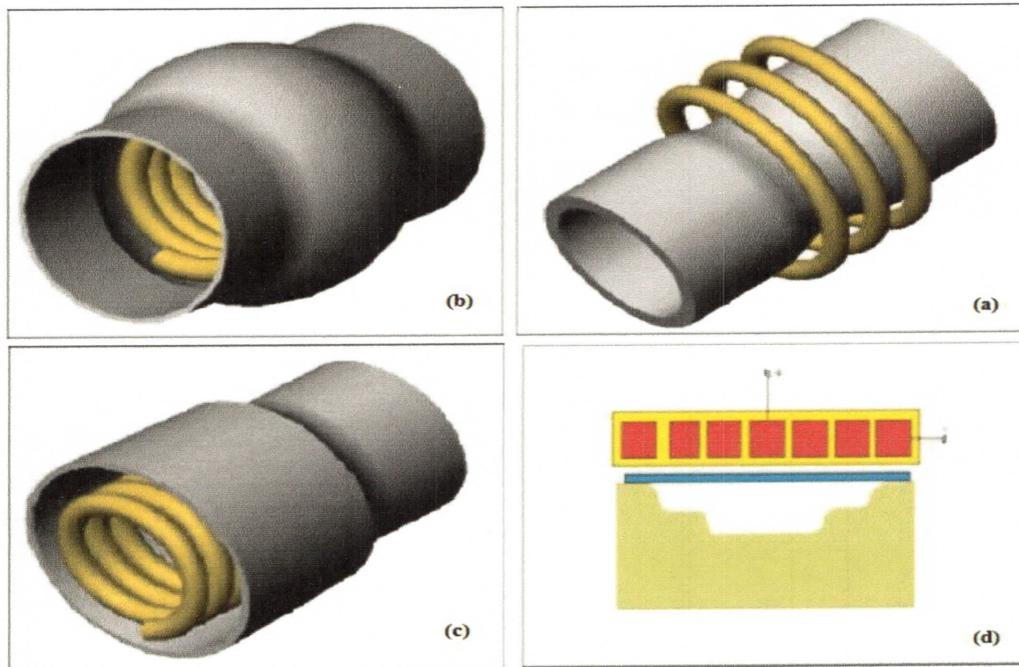


Fig. 1.15: (a) compression de tube (b) et (c) Expansion de tube (d) Placage de pièces plates [4]

On distingue trois opérations essentielles :

- La compression.
- L'expansion.
- L'emboutissage (placage).



Fig. I.16 : Exemples de pièces formées par impulsion magnétique [16]

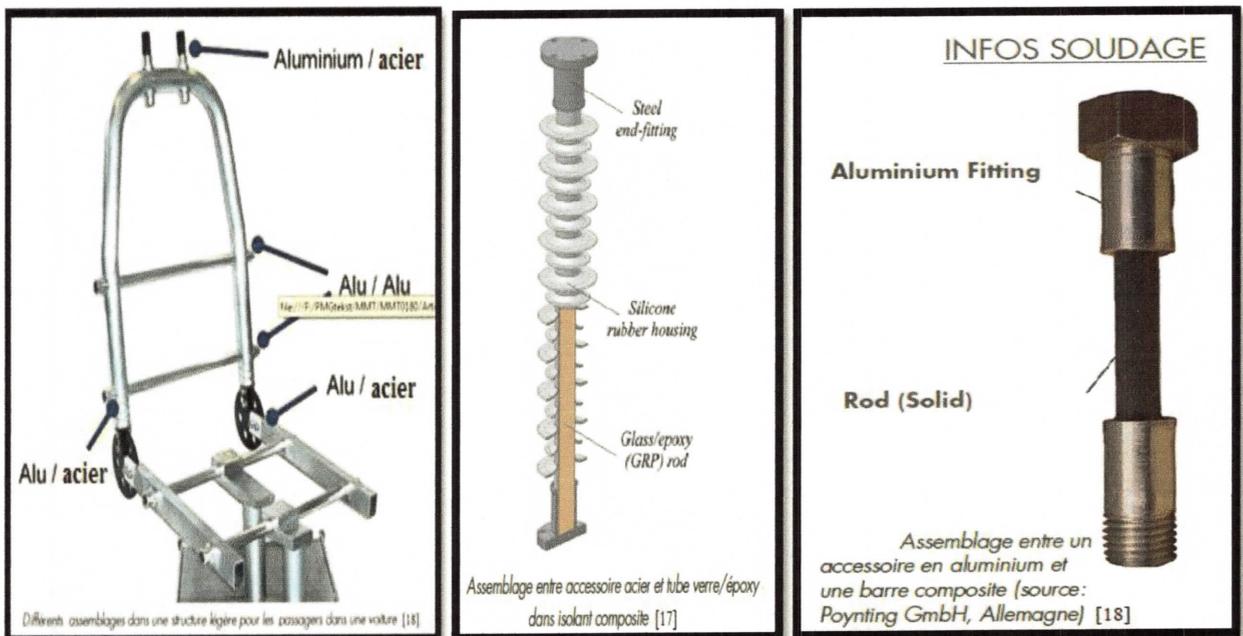
### I-3-3 Influence des divers paramètres sur la déformation :

Les différents paramètres influant sur la déformation sont [17] :

- Résistivité de la pièce
- Nombre de spires de la bobine de champ
- intensité du courant de décharge
- distance entre la bobine et la pièce
- épaisseur de la pièce
- fréquence de travail
- ductilité du métal de la pièce

### I-4 Applications industrielles

Divers pièces industrielles sont usinées par la technique de formage magnétique :



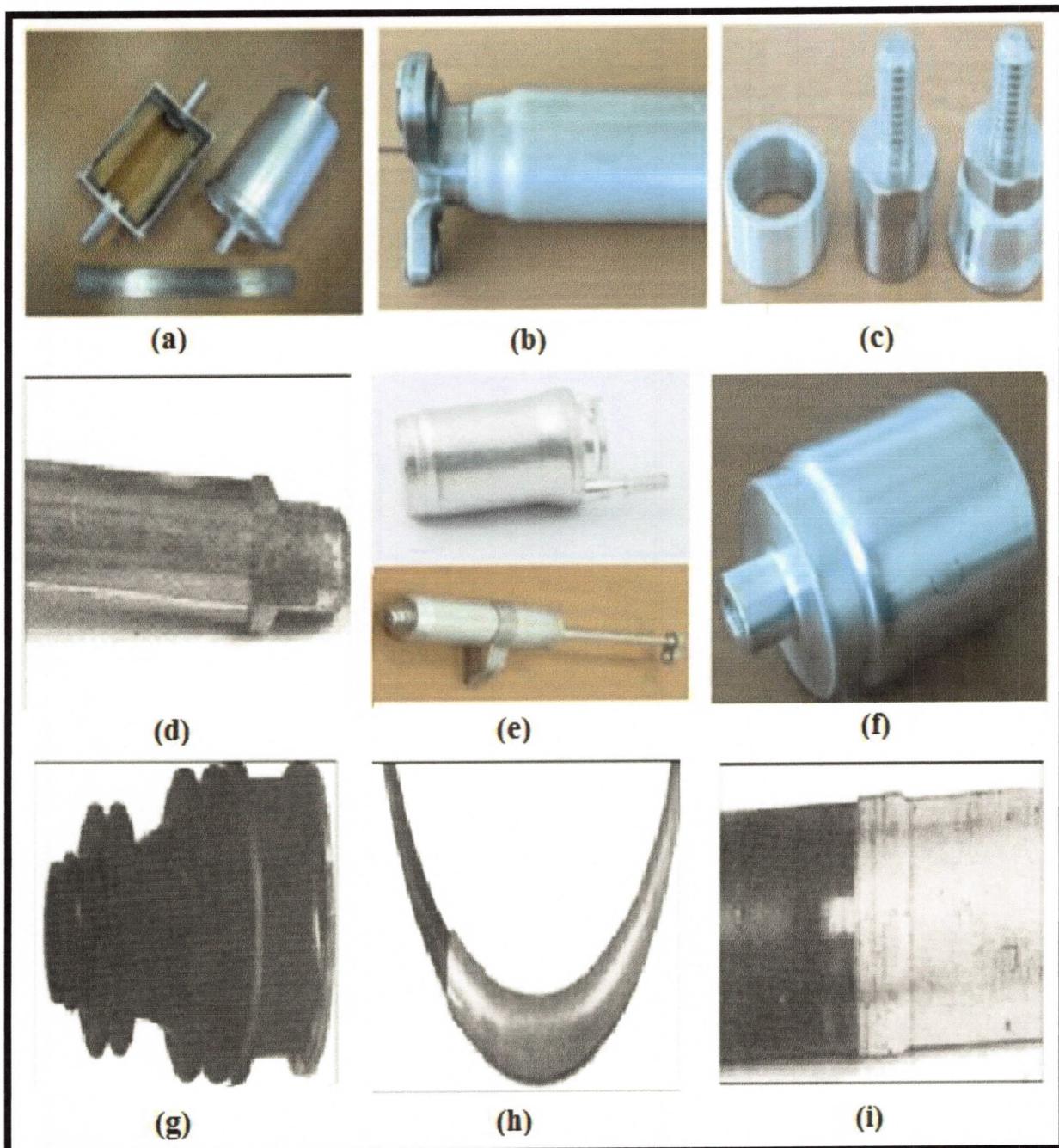


Fig. I.17 Exemples d'applications industrielles du formage magnétique : (a) filtre à carburant , (b) arbre d'entraînement en Al/Acier , (c) mise à la terre , (d) Echaufages , (e) filtre à carburant et récepteurs sèche f) capsule à haute pression , g) soufflets de cardans , (h) armatures de volants, ( i) conduit de gaz [18] [19]

## I-5 Avantages et inconvénients du procédé FEM

### I-5-1 Avantages

Le processus de formage électromagnétique possède plusieurs avantages sur les autres processus classiques de formage. Cette technologie ne produit ni chaleur, ni rayonnement, ni gaz ou fumée. On peut donc parler de technologie qui contribue à préserver l'environnement.

Pour le soudage, le grand avantage réside dans l'absence de température élevée, d'où la possibilité de souder des combinaisons impossibles par fusion. En effet, l'absence de chauffage permet d'assembler des matériaux métalliques dont les points de fusion peuvent être très différents. [1] [8]

Les avantages les plus importants sont cités ci-dessous :

- Perfectionnement important dans la formalité.
- Possibilité d'assemblages plusieurs matériaux.
- Réduction des coûts et des composants.
- De très fortes tolérances sont possibles.
- Consommation d'énergie inférieure de 30-50% aux procédés conventionnels.
- Les opérations de formage et assemblage peuvent être combinées en une seule opération.
- Meilleure conductibilité dans la zone soudée.
- Absence de corrosion dans la zone soudée.
- C'est un processus « propre » puisqu'aucun lubrifiant n'est nécessaire.

### I-5-2 Inconvénients

En plus d'avoir nombreux avantages, il existe également certaines limitations et inconvénients du processus de FEM. [1] [8]

Les inconvénients de la FEM sont signalés ci- dessous :

- Seulement les matériaux conducteurs peuvent être formés directement.
- Considération de sécurité importante.
- Restrictions géométriques.
- Chaque type de pièce formée par l'impulsion magnétique nécessite une bobine spécifique. Il faudra donc une machine adaptée à chaque application.

### **I-6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les techniques du formage électromagnétique, et les opérations industrielles de mise en forme des matériaux conducteurs par impulsion magnétique aussi, les différents constituants d'une installation de FEM, ont été détaillés.

D'autre part, nous avons présenté l'importance de ce type de formage, ses avantages et ses inconvénients.



# Chapitre II

## II.1 Introduction

Comme il a été déjà mentionné, le FEM est un processus complexe, provoquant la déformation plastique d'une pièce, résultant d'interactions entre champs électromagnétiques.

La simulation numérique offre une compréhension meilleure des phénomènes physiques et du comportement lors du processus de FEM. Par conséquent, elle permet l'optimisation et la prédiction des paramètres nécessaires pour le formage d'une pièce et donc l'amélioration de l'efficacité du processus.

Notre objectif est de développer un modèle simple mais précis qui peut simuler le processus de formage par impulsion magnétique d'une plaque ou d'un tube. Nous avons choisi de développer un modèle élément finis couplant le problème électromagnétique et celui mécanique mis en jeu lors de ce processus. Notre modèle numérique a été développé sous l'environnement du logiciel Comsol multiphysique.

## II.2 Phénomènes électromagnétiques

Les Phénomènes électromagnétiques se produisant pendant le processus FM sont régis par un ensemble d'équations aux dérivées partielles communément connu comme les équations de Maxwell. Les équations de Maxwell, les relations constitutives des milieux, la loi d'ohm et les conditions de passage entre deux milieux sont utilisées pour définir les principaux phénomènes électriques et magnétiques existant pendant le processus [20].

### II.2.1 Equations de Maxwell :

Les équations qui régissent l'ensemble des phénomènes électromagnétique peuvent être exprimées à travers les principales équations de Maxwell données sous la forme différentielle suivante [21] :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (\text{Equation de Maxwell-Ampère}) \quad (II.1)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (\text{Equation de Maxwell-Faraday}) \quad (II.2)$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{Equation de Maxwell-Thomson}) \quad (II.3)$$

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{Equation de Maxwell-Gauss}) \quad (\text{II.4})$$

Où :

$\vec{H}$  (A/m) représente le champ magnétique

$\vec{B}$  (T) l'induction magnétique,

$\vec{E}$  (V/m) le champ électrique

$\vec{j}$  (A/m<sup>2</sup>) la densité de courant

$\vec{D}$  (A.S/m<sup>2</sup>) Induction électrique

$\rho$ (C/m<sup>2</sup>) la densité de charge.

### II.2.2 Lois de comportement du milieu

Le comportement électrique et magnétique des différents milieux du domaine est pris en compte par les lois de comportement. Celles-ci lient les différents champs magnétiques et électrique entre eux. Ces relations mettent en jeu non seulement les champs eux-mêmes mais aussi des variables, comme la température ou bien encore les contraintes mécaniques. On supposera dans la suite ces variables constantes. Ainsi, les lois ne dépendent alors que des champs. Dans un problème d'électrotechnique, la conductivité électrique est généralement supposée constante dans chaque milieu. On obtient alors une relation de la forme :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $\sigma$  la conductivité électrique.

Pour le comportement magnétique, si le matériau n'est pas ferromagnétique, le modèle est linéaire de la forme :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

Avec :  $\mu_0$  est la perméabilité de l'air et  $\mu_r$  est la perméabilité relative.

Pour les matériaux ferromagnétiques, on peut utiliser des modèles relativement complexes qui prennent en compte le phénomène d'hystérésis. Mais leur introduction dans des modèles numériques conduit à une augmentation du temps de calcul qui peut être acceptable en

2D mais plus du tout en 3D. Aussi on préférera utiliser, dans le cas de matériaux ferromagnétiques doux, une relation de la forme (II.6) avec  $\mu_r$  qui peut dépendre ou non de  $\vec{H}$ .

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

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

Avec :  $\vec{B}_r$  l'induction rémanente et  $\mu_a$  la perméabilité magnétique de l'aimant qui est supposée constante et proche de la perméabilité de l'air.

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

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

Avec :  $\varepsilon$  est la permittivité électrique

### II.2.3 Conditions de passage

Les équations de Maxwell entraînent, aux interfaces entre deux milieux de propriétés physiques différentes, les conditions de passage sont les suivantes :

- La condition de conservation de la composante normale de l'induction magnétique :

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.9})$$

- La condition de la continuité de la composante tangentielle du champ électrique :

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

- La condition de continuité de la composante normale de la densité du courant de conduction ou interface entre de milieux de conductivités électriques différentes :

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

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

Afin de résoudre ce système d'équations, le potentiel magnétique vecteur noté  $\vec{A}$  est introduit à partir de l'équation (II.3):

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{Changement de variable à partir } \overrightarrow{\text{div}}(\vec{B}) = 0) \quad (\text{II.12})$$

Pour assurer l'unicité de  $\vec{A}$ , une condition de jauge doit être ajoutée (jauge de Coulomb) (II.13) :

$$\overrightarrow{\text{div}}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II.13})$$

L'équation (II.2) associée à l'équation (II.12) conduit à l'équation (II.14) :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.14})$$

Dans cette dernière équation (II.14),  $\vec{E}$  n'est pas définie de manière unique car le champ électrique dépend du potentiel électrique  $V$  qui conduit à introduire la conservation de la densité de courant à partir de l'équation (II.1)

$$\overrightarrow{\text{div}}(\vec{J}) = 0 \quad (\text{II.15})$$

Finalement on obtient :

$$\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} V \right) + \overrightarrow{\text{rot}}(\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{j}_{\text{ex}} \quad (\text{II.16})$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \left( \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} V \right) \right) = 0 \quad (\text{II.17})$$

Où :  $\nu = \frac{1}{\mu}$  est la reluctance magnétique.

#### II.2.4 Forces électromagnétiques :

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

$$\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.18})$$

### II.2.5 Équation électromagnétique :

Afin de développer un modèle numérique pour l'étude des systèmes de formage électromagnétique, il est nécessaire de coupler les équations électromagnétiques et les équations mécaniques pour analyser le comportement temporel et spatial des différents composants d'un dispositif de FEM.

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

$$-\text{div} \left( \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \vec{v} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V - \overrightarrow{\text{jex}} \right) = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{rot}} (\mu^{-1} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) - \sigma \vec{v} \text{div} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V = \overrightarrow{\text{jex}} \quad (\text{II.20})$$

Le système précédent peut être réduit en utilisant la transformation suivante :

$$\vec{A} = \vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.21})$$

Ainsi, nous obtenons :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{rot}} (\mu^{-1} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) - \sigma \vec{v} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{jex}} \quad (\text{II.22})$$

### II.2.6 Calcul des courants induit

L'équation nécessaire pour calculer les courants induits est la suivante :

$$\overrightarrow{\text{jind}} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \wedge (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) \quad (\text{II.23})$$

### II.2.7 Effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire ou encore effet Kelvin se retrouve dans tous les conducteurs traversés par un courant alternatif. Il se traduit par la décroissance exponentielle de la densité de courant avec l'épaisseur du conducteur, voir presque en surface lorsque les fréquences sont élevées [9].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (\text{II.24})$$

$\rho$  : La résistivité de la pièce

$\omega$  : La pulsation du courant

Avec :  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_T}}$

L : l'inductance du circuit

$C_T$  : La capacité des condensateurs

## II.3 Phénomènes mécaniques

### II.3.1 Équation d'équilibre

L'équation fondamentale régissant la déformation de tout matériau isotrope est donnée par l'équation d'équilibre appelée en 3D, la seconde loi de Newton :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (\text{II. 25})$$

Avec :

$\vec{u}$  : Le champ de déplacement (u,v,w)

$\sigma$  : Le tenseur de contraintes

$\vec{F}$  : Le vecteur de charge

$\rho$  : La masse volumique.

### II.3.2 Relation déformation-déplacement

En tout point, la déformation  $\varepsilon$  est complètement définie par les composantes (u,v,w) et leurs dérivées. Elle est formée par 3 composantes :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (\text{II.26})$$

Avec :

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

$\varepsilon_{th}$  : La déformation thermique donné par :  $\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$

$\alpha$  : Le coefficient d'expansion thermique

$\varepsilon_p$  : La déformation plastique.

T : Température.

$T_{ref}$  : Température de référence (ambiante).

Dans notre modélisation des systèmes de formage magnétique, la déformation thermique n'est pas considérée.

Les composantes de la déformation sont :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{II.27})$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{II.28})$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{II.29})$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (\text{II.30})$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{yz} \quad (\text{II.31})$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xz} \quad (\text{II.32})$$

### II.3.3 Relation contrainte-déformation

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

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

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

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

Pour le comportement mécanique des matériaux nous utilisons deux cas :

- Elastoplastique.
- Isotrope.

#### a) Cas Elastoplastique

La relation contraintes-déformation est :

$$\sigma = D_{\varepsilon_{el}} + \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_p - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

$E$  : Le module de Young.

$\nu$  : Le coefficient de poisson.

$\varepsilon_0$  : Contrainte initiale.

La déformation plastique est définie par :

$$\dot{\varepsilon}_p = \lambda H(\varepsilon_p, k, \nu) \dot{k} = \lambda G(\varepsilon_p, k, \nu) \quad (\text{II.35})$$

Avec:

$\lambda$  : est le multiplicateur plastique .

Dans le cas de modèle parfaitement plastique :

$$K = \varepsilon_p \quad , \quad F = \phi(\sigma - Y_0) \quad , \quad H = \frac{\partial F}{\partial \sigma}$$

### b) Cas isotrope

Dans ce cas la matrice D est différente :

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Et :

$$\sigma = D_d \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{xy0} \\ \varepsilon_{yz0} \\ \varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (\text{II.37})$$

Avec:

$$D_d = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

### II.3.4 Symétrie axiale

En axisymétrie, les coordonnées cylindriques  $r$ ,  $\theta$  et  $z$  sont utilisées. Dans ce cas, le déplacement dans la direction  $\theta$ , les composantes de la contrainte  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$  ainsi que les composantes de la déformation  $\gamma_{r\theta}$ ,  $\gamma_{\theta z}$  sont supposées nulles. Les charges sont indépendantes de  $\theta$  et seulement les charges dans les directions  $r$  et  $z$  sont considérées.

Afin d'éliminer toutes divisions par  $r$  qui cause problème en  $r = 0$ , les équations sont transformées. La première est multipliée par  $r^2$  et la deuxième par  $r$  et une nouvelle variable  $u' = \frac{u}{r}$  est introduite.

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

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (\text{II.39})$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (\text{II.40})$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{II.41})$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (\text{II.42})$$

## II.4 Formulations numériques

### II.4.1 Méthode des éléments finis

Les équations aux dérivées partielles présentées dans ce chapitre ne peuvent être résolues, d'une manière générale, par des méthodes analytiques telles que la méthode de séparation des variables [22], [23], ou les méthodes intégrales [24] [23], surtout pour des problèmes complexes. Parmi les méthodes numériques existantes, nous citons [22] :

- La Méthode des Différences Finies (MDF)
- La Méthode des Volumes Finis (MVF)
- La Méthode des Eléments Finis (MEF)
- La Méthode des Intégrales de Frontières (MIF)

Parmi les méthodes citées, la plus utilisée dans le calcul du champ dans les structures électromagnétiques est la méthode des éléments finis [25], que nous retiendrons pour l'étude de nos systèmes.

La méthode consiste à transformer une équation aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Cela se fait par discrétisation du domaine d'étude. L'Equation aux Dérivées Partielles (EDP) est exprimée dans chaque sous domaine afin de générer des équations liées à chacun d'eux. Un assemblage de ces équations, prenant compte des conditions aux limites ainsi que des caractéristiques des milieux considérés et des sources de courants est réalisé. Le système algébrique final est résolu avec des méthodes numériques.

La plupart des premiers codes (MEF) utilisaient des méthodes directes [26], [27], [28], Ces méthodes offrent comme avantage une certaine robustesse et stabilité. Aucune erreur d'arrondi ou d'estimation n'existe et la solution proposée est exacte.

## II.5 couplage

### II.5.1 couplage faible

La démarche suivie pour un couplage faible est la suivante :

- L'équation électromagnétique est résolue à chaque pas de temps.

- Les forces magnétiques calculées sont les termes sources de l'équation mécanique qui est résolue par élément finis, donnant les déformations.
- Par contre, les sources de l'équation thermique sont représentées par les quantités de chaleur dégagées par effet joule.
- Pour tenir compte de la déformation de la pièce, la géométrie est remaillée.

Ainsi, ce processus itératif est répété jusqu'à la dernière étape de calcul.

### II.5.2 couplage fort

Le couplage fort est celui qui donne les résultats les plus proches de la réalité et nécessite la résolution du système globale (équations électromagnétiques, mécaniques et thermiques) à chaque pas de temps et de manière transitoire. L'inconvénient de ce type de couplage est la manipulation de larges matrices et par conséquent la nécessité de plus d'espace mémoire et de temps de calcul. Pour tenir compte de la déformation de la géométrie, cette dernière est remaillée à chaque pas de temps.

C'est le type de couplage qui a été utilisé dans ce travail grâce au logiciel Comsol qui permet d'effectuer ce genre de couplage sans difficultés.

### II.5.3 Termes de couplage

Les termes de couplage sont représentés par :

- Pour l'équation thermique, c'est la source de chaleur qui est évacuée par effet Joule :

$$Q = \frac{1}{2\sigma} J^2 \quad (\text{II.43})$$

Cependant, tous les paramètres électromagnétiques et mécaniques sont considérés, indépendants de la température.

Cette hypothèse est tout à fait acceptable, puisque les différentes températures obtenues ne sont pas très importantes et par conséquent, son influence est négligeable.

- Pour l'équation mécanique, c'est les forces qui s'appliquent sur la pièce dont les forces électromagnétiques sont les plus prépondérantes.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.44})$$

Les modèles développés sont implémentés afin de simuler différents systèmes de formage magnétique bidimensionnels

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

## II.6 Présentation du logiciel COMSOL

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulations multi-physiques.

Pour étendre les simulations possibles, COMSOL Multiphysics comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient vos simulations réalisées dans COMSOL Multiphysics à des logiciels tiers de calcul (Matlab, Catia...)[29].



## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au développement et la présentation des modèles mathématiques et numériques concernant tous les phénomènes physiques (phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques) mis en jeu lors de tout processus de formage électromagnétique.

En outre, une brève présentation du logiciel COMSOL utilisé a été faite.



# Chapitre III

### III.1.Introduction

Les modèles développés, dans le chapitre précédent, sont validés pour différents dispositifs de formage magnétique. Dans certains cas, des études paramétriques sont menées pour analyser l'effet des paramètres géométriques et physiques des installations industrielles simulées.

Tous les résultats obtenus, en utilisant le logiciel COMSOL, sont présentés et interprétés dans ce chapitre.

### III.2. 1<sup>ère</sup> application : Emboutissage de plaques

L'emboutissage est un procédé de formage qui consiste à transformer une tôle plane en une forme creuse de géométrie plus ou moins complexe.

Notre dispositif de magnétoformage destiné à l'emboutissage d'une plaque en Aluminium, est le même système déjà étudié expérimentalement par la référence [30]. Le système, montré dans la figure III.1, dont les paramètres sont regroupés dans le tableau III.1, comporte une plaque conductrice, placée au-dessus d'une bobine en cuivre, formée par 7 spires rectangulaires.

Dans le modèle numérique, seulement la moitié du système est simulée, à cause de la symétrie axiale de la géométrie.

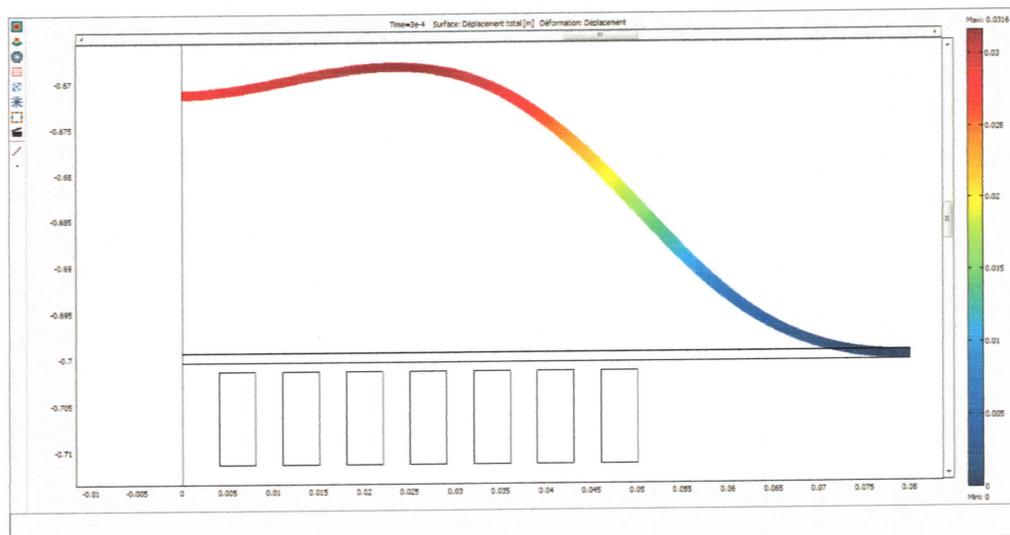


Fig. III.1 : Géométrie d'emboutissage

Nombre de spires n	7
Section d'une spire inductrice	0.4 *10 <sup>4</sup> [m <sup>2</sup> ]
Rayon extérieur de la bobine	50mm
Conductivité	5.998e7[S/m]
La perméabilité	4*pi e-7 H/m
Rayon de la plaque	80mm
Epaisseur de la plaque	1mm
Conductivité électrique de la plaque	3.774e7[S/m]
La perméabilité	4*pi e-7 H/m
Résistance R	25.5 mΩ
Inductance L	2 μH
Capacité C	40 μF

Tableau III.1 : paramètres du système d'emboutissage

**Premier cas**

Le premier cas est complètement identique à celui étudié expérimentalement dans la référence [30], l'inducteur en cuivre, délivre un courant de décharge sous forme d'une rampe de courant (fig. III.2):

$$I(t)=2. 10^9.t.....(III.1)$$

**Deuxième cas :**

La plaque et l'inducteur sont identiques à ceux du premier cas, mais le courant d'excitation est un courant de décharge de la forme :

$$I(t)=V_0\sqrt{\frac{C}{L}} \exp (-\xi\omega t) \sin 2\pi ft .....(III.2)$$

Avec :  $\xi=\frac{1}{2}R\sqrt{\frac{C}{L}}$  ;  $\omega=\sqrt{\frac{1}{Lc}}$  ;  $V_0= 500 \text{ KV}$   $f=17803 \text{ Hz}$

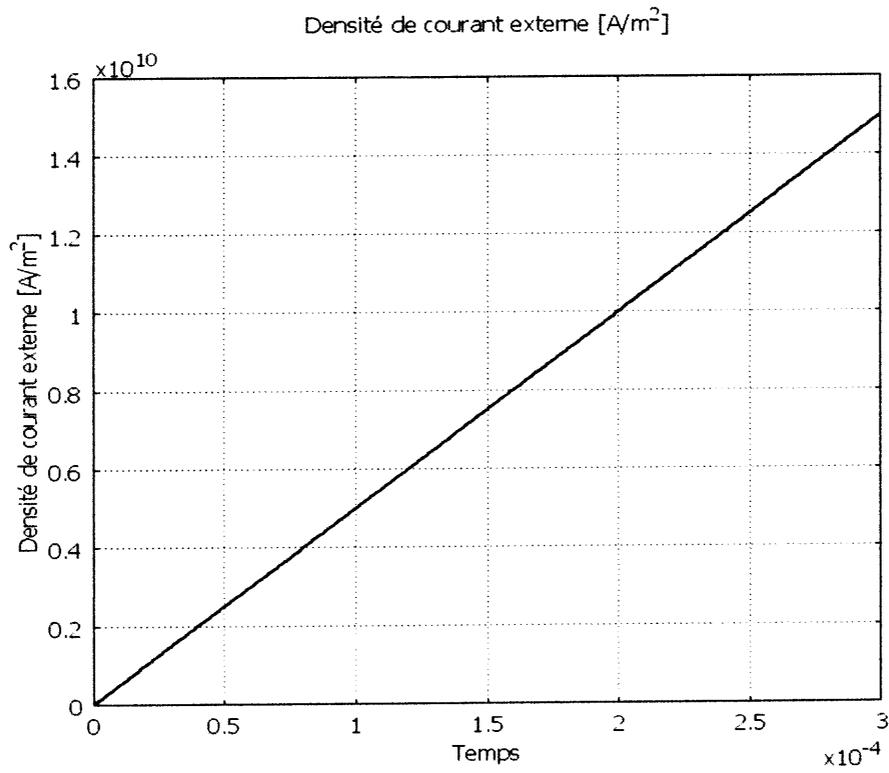


Fig.III.2 : densité de courant décharge du système d'emboutissage (premier cas)

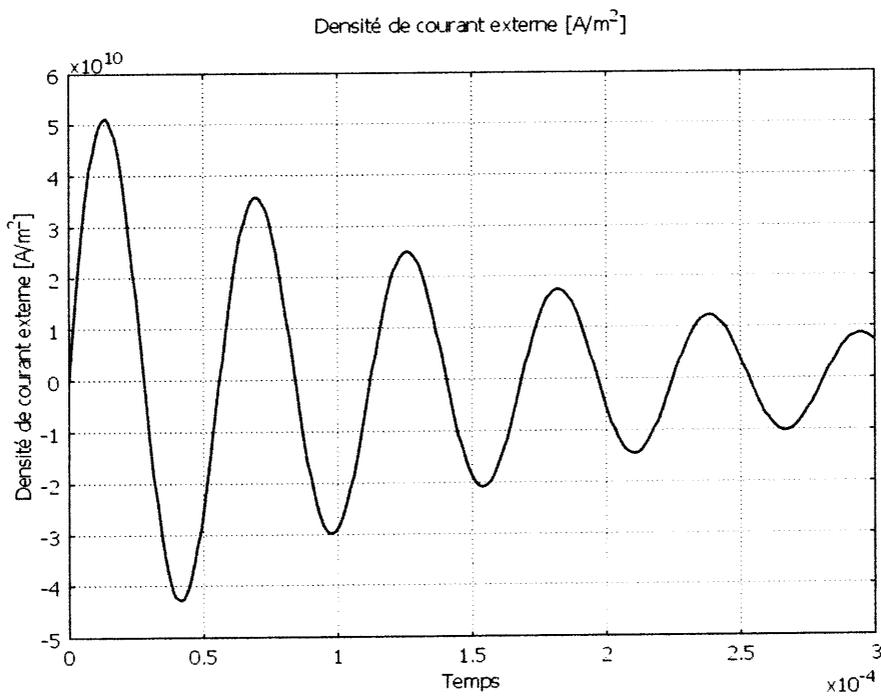


Fig.III.3 : densité de courant décharge du système d'emboutissage de plaque (deuxième cas)

### III.2.1. Comportement de la plaque lors de l'emboutissage

D'après les résultats numériques obtenus (figures III.4 et III.5), nous pouvons remarquer que malgré que les forces de Lorentz sont plus faibles dans le cas de courant sinusoïdal amorti, mais la déformation de la plaque est plus accentuée dans ce cas.

Cela, peut être expliqué par le fait que le courant rampe continue à augmenter en fonction du temps et par conséquent, les courants induits dans la plaque et les forces de Lorentz suivent les mêmes variations. Cependant, le comportement mécanique et donc la déformation ne varient pas de la même manière.

De plus, les formes de la plaque emboutie, obtenues numériquement dans les deux cas, sont différentes, elles sont plus uniformes dans le deuxième cas. En effet, d'après les travaux antérieurs [31] [1] [32], le courant de décharge sinusoïdal amorti est le plus approprié pour le formage électromagnétique.

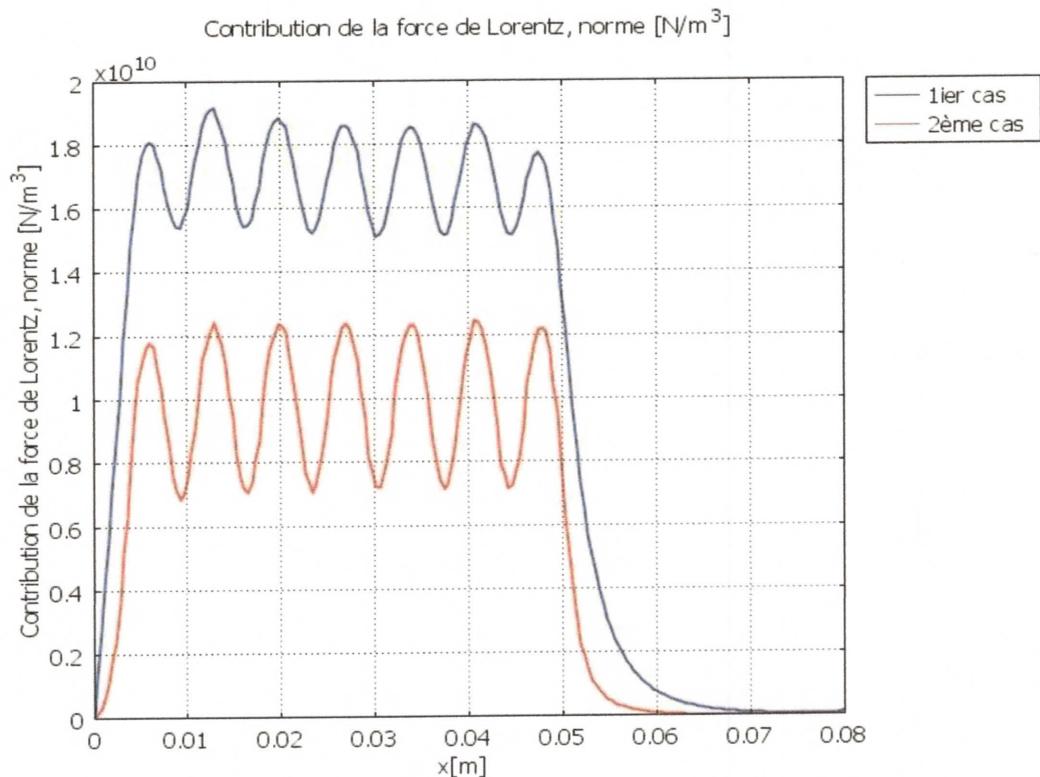


Fig.III.4 : Contribution de la force de Lorentz maximale

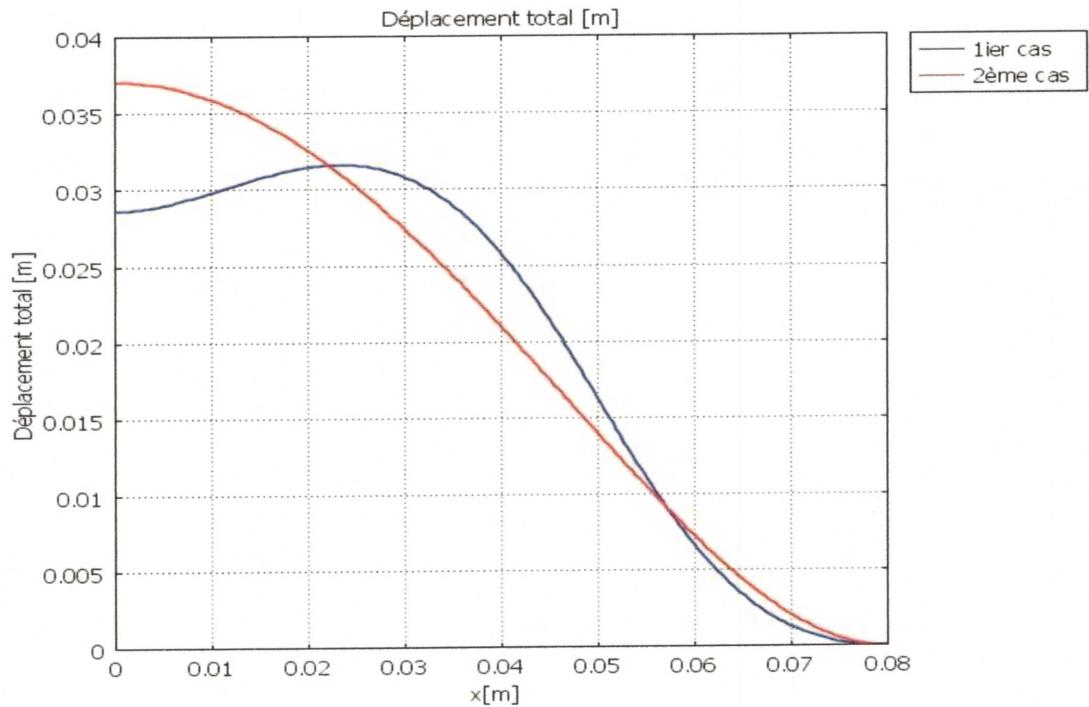


Fig.III.5 : Déplacement total à  $t=300 \mu s$

### III.2.2. Effet du nombre de spires

Une étude paramétrique a été menée afin de mettre en évidence l'influence de différents paramètres géométriques et physiques de l'installation d'emboutissage sur le comportement de la plaque.

Dans un premier temps, nous avons utilisé différents inducteurs avec 3, 5, 7 et 9 spires afin d'analyser l'effet du nombre de spires sur la déformation de la plaque.

D'après La figure III.6, la déformation finale de la plaque est proportionnelle au nombre des spires utilisées durant l'application.

Ce comportement est dû au fait que les courants induits et par conséquent les forces de Lorentz (figure III.7) s'intensifient relativement avec l'augmentation de nombre des spires.

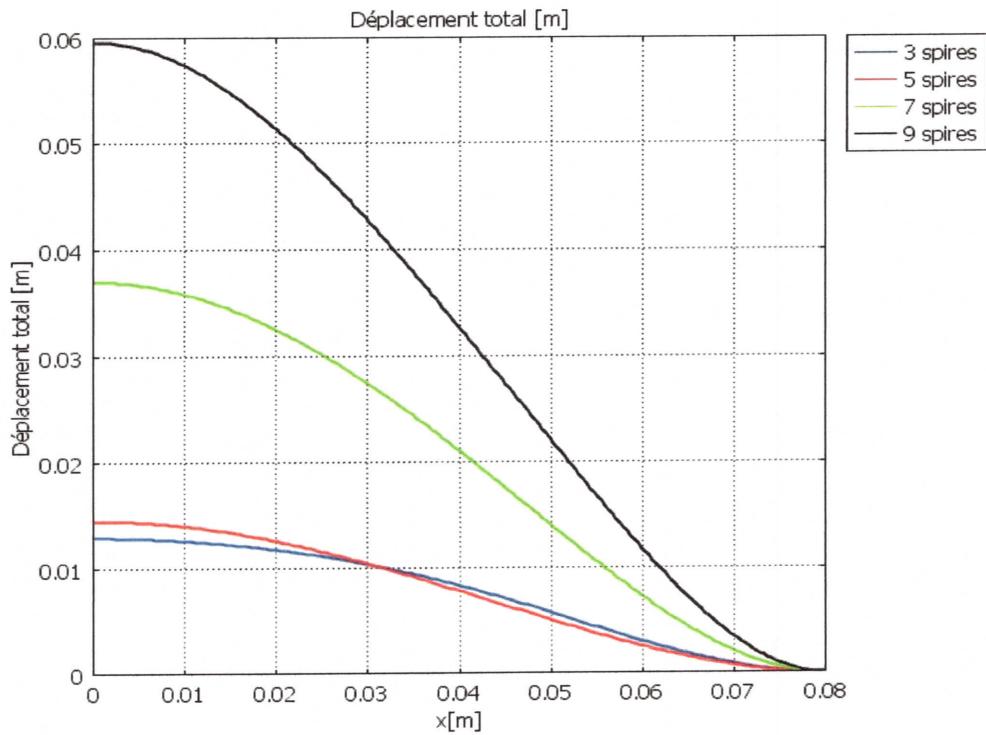


Fig.III.6: Déplacement total pour différents nombre de spires de la bobine

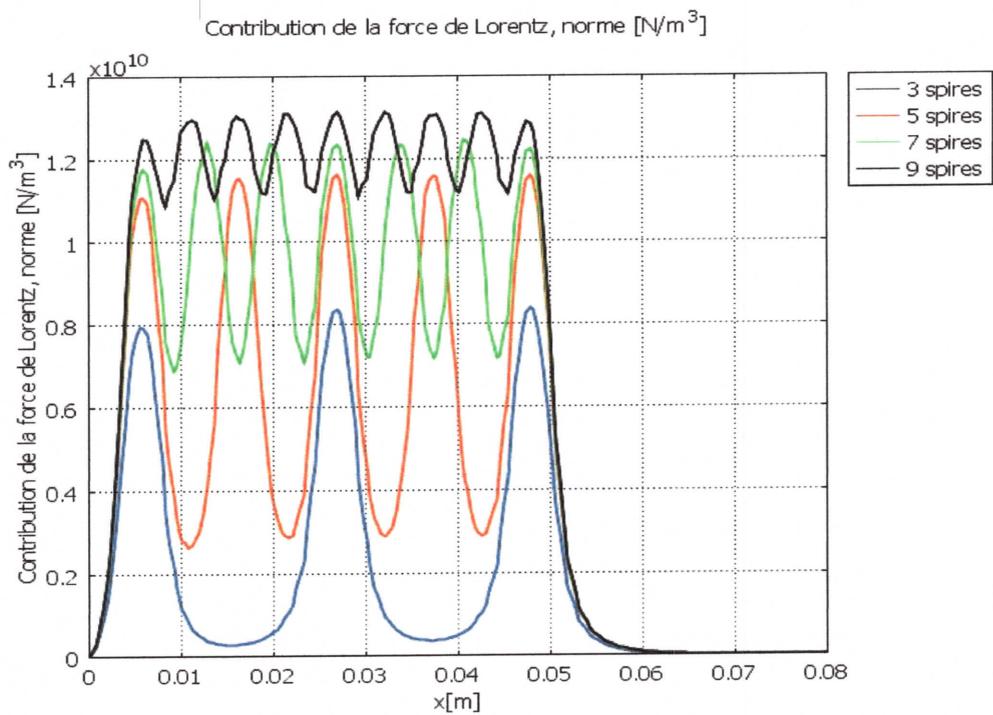


Fig.III.7 : contribution de la force de Lorentz pour différents inducteurs

### III.2.3. Effet de la distance entre l'inducteur et la plaque

Un autre paramètre à étudier est la distance séparant la bobine de la plaque.

Les résultats numériques sont tout à fait prévisibles (fig. III. 8 et III.9).

En effet, plus la bobine est proche de la plaque, plus les courants induits dans la pièce, les forces électromagnétiques et par conséquent la déformation de celle-ci sont importants.

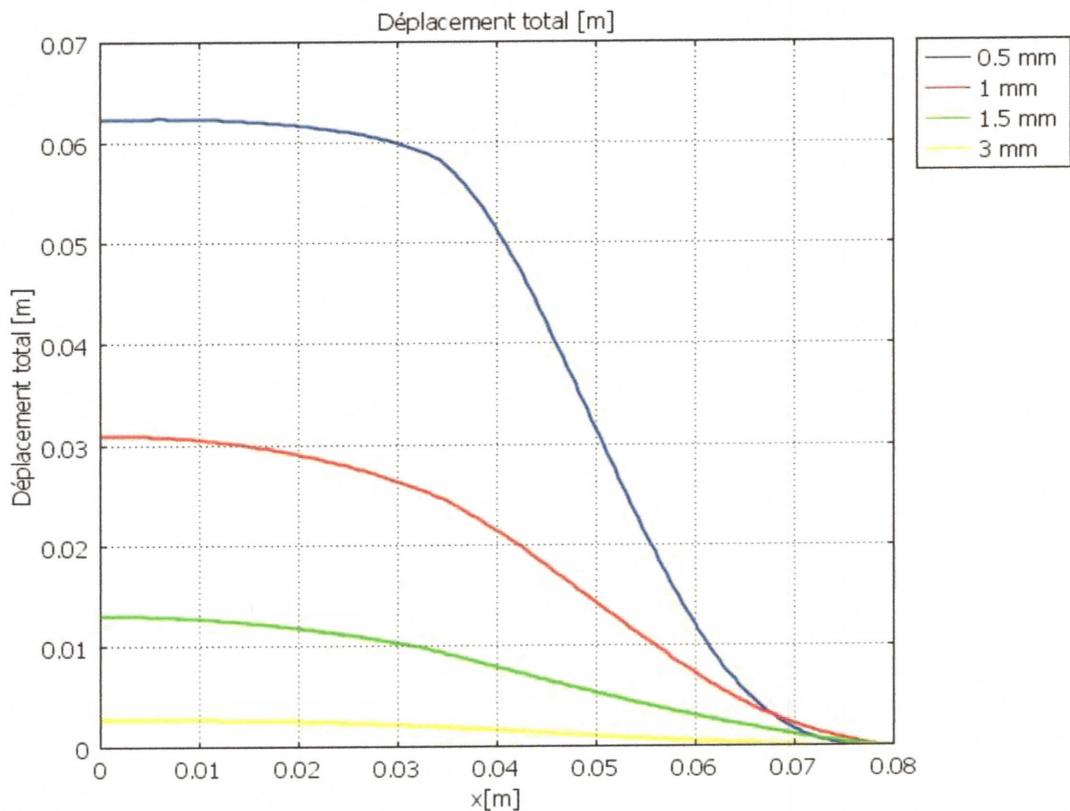


Fig.III.8: Déplacement total pour différentes distances bobine-pièce

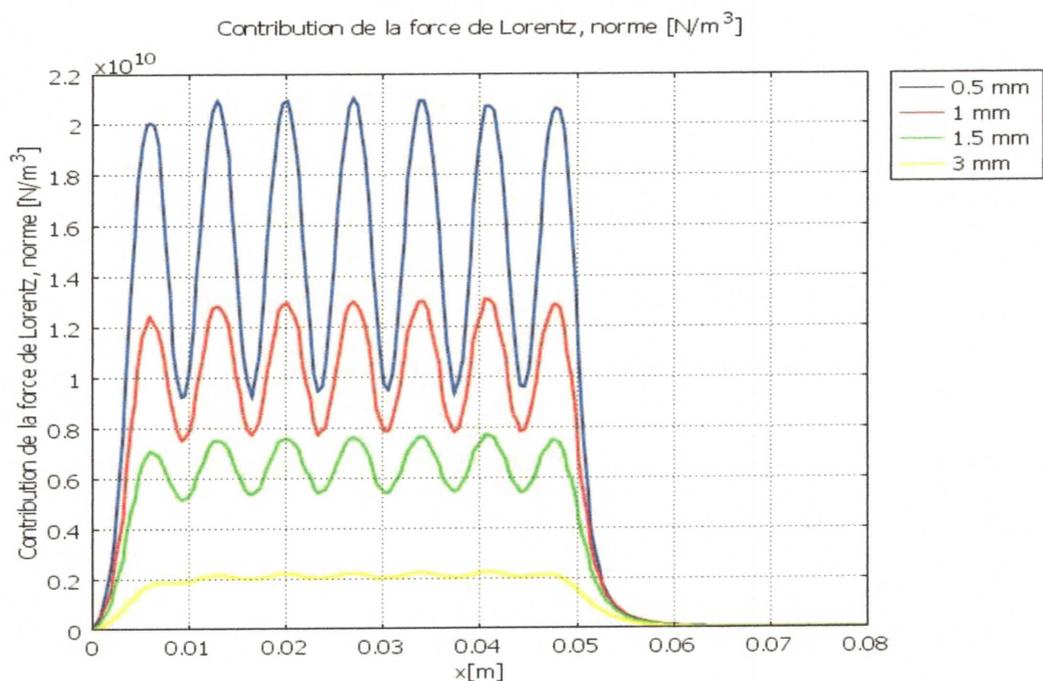


Fig.III.9 : contribution de la force de Lorentz pour différentes distance entre la pièce et l'inducteur

#### III.2.4. Effet de l'épaisseur de la plaque

L'épaisseur de la plaque est aussi un paramètre géométrique important.

Nous avons utilisé différentes plaques d'épaisseur : 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, et 2.5mm.

Evidemment, la déformation (fig. III.10) est d'autant plus grande que l'épaisseur de la plaque est faible.

Nous pouvons conclure que dans magnétoformage, il est fortement conseillé d'utiliser des pièces minces.

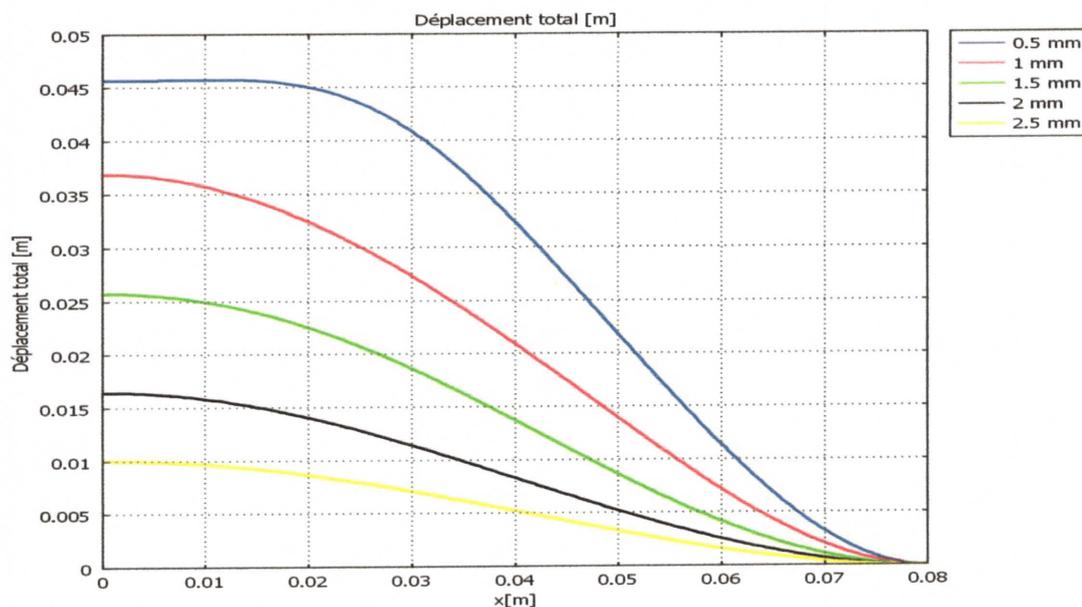


Fig.III.10 : Déplacement total pour différentes épaisseurs de la pièce

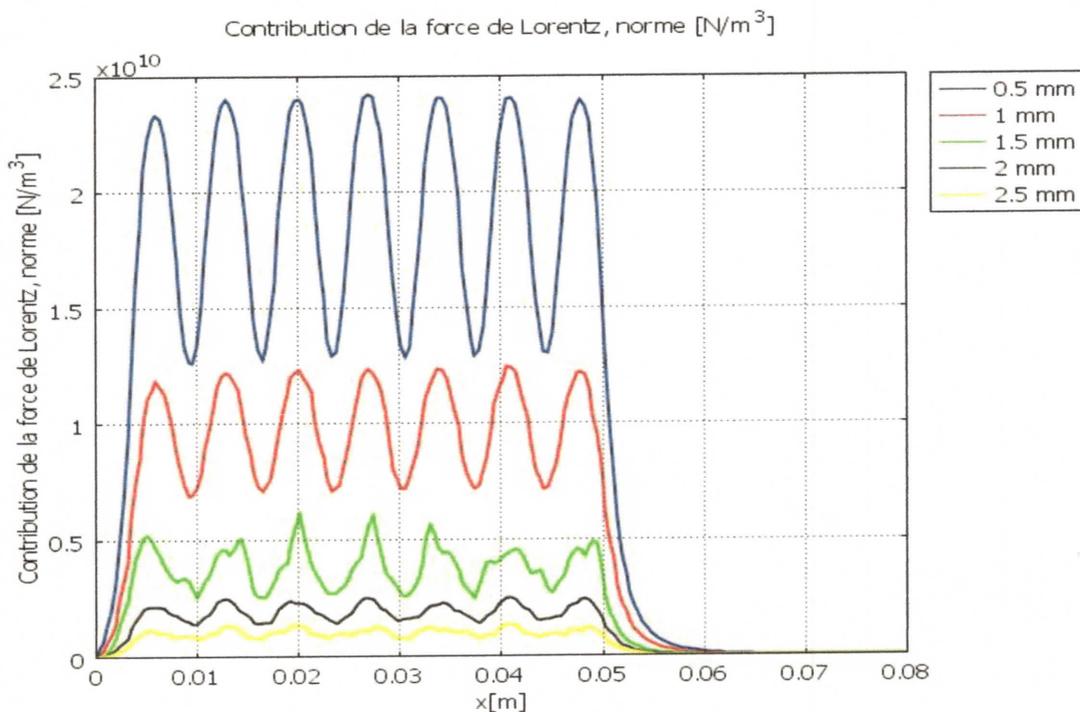


Fig.III.11 : Forces de Lorentz le long de la plaque pour différents épaisseurs

### III.2.5. Effet de la nature du matériau de la pièce

Pour effectuer une analyse comparative nous avons utilisé différents matériaux de la plaque. Les paramètres de chaque matériau sont présentés dans le tableau suivant :

	Conductivité [s/m]	Module de Young [Pa]	Densité [kg /m <sup>3</sup> ]	Coeff. de poisson
<b>aluminium 3003-H18</b>	2,326. 10 <sup>7</sup>	69 . 10 <sup>9</sup>	2730	0.33
<b>Aluminium</b>	3,774 . 10 <sup>7</sup>	70 . 10 <sup>9</sup>	2700	0.33
<b>Cuivre</b>	5,998. 10 <sup>7</sup>	110 . 10 <sup>9</sup>	8700	0.35
<b>Acier AISI 4340</b>	4,032. 10 <sup>7</sup>	205. 10 <sup>9</sup>	7850bh	0.28

Tableau .III.2 Caractéristiques des différents matériaux utilisés

La distribution de la densité de courant induit crée dans différents matériaux (figure III.12), montre que le courant est proportionnel à la conductivité de la pièce à déformer et par conséquent, les courants induits les plus importants sont créés au niveau du cuivre ainsi que les forces de Lorentz créées dans ce matériau (fig. III.13).

Cependant, bien que les forces et par conséquent les contraintes ne sont pas très différentes entre l'aluminium, un de ses alliages et le cuivre, mais nous remarquons que les déformations s'éloignent et la meilleure déformation est celle de l'aluminium. Par contre, le matériau Steel AISI4340 présente la plus faible déformation, et cela revient au comportement mécanique différent des matériaux qui dépend fortement des paramètres mécaniques, en particulier le module de Young.

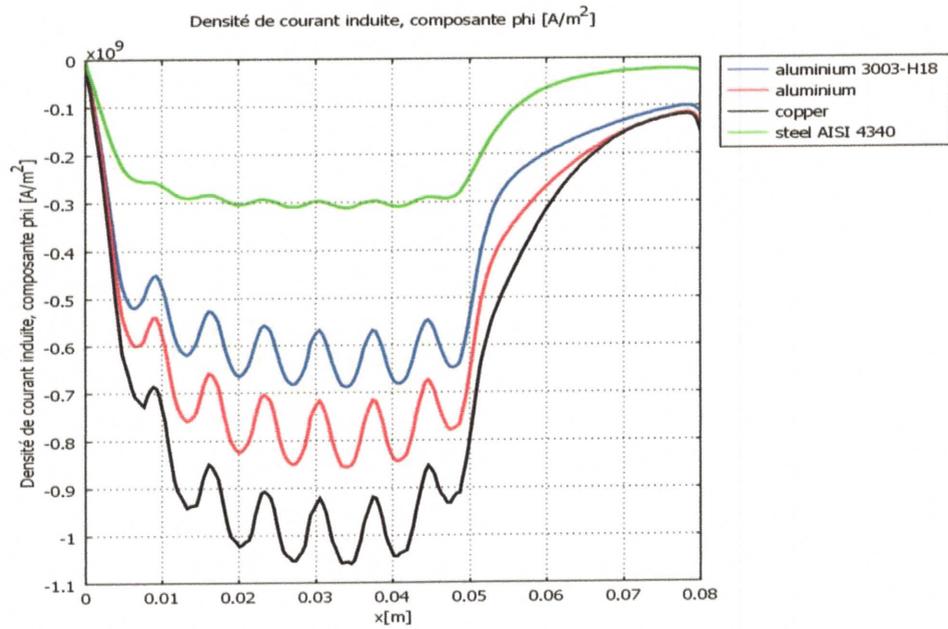


Fig.III.12 : Densité de courant induite maximal dans les différentes plaques

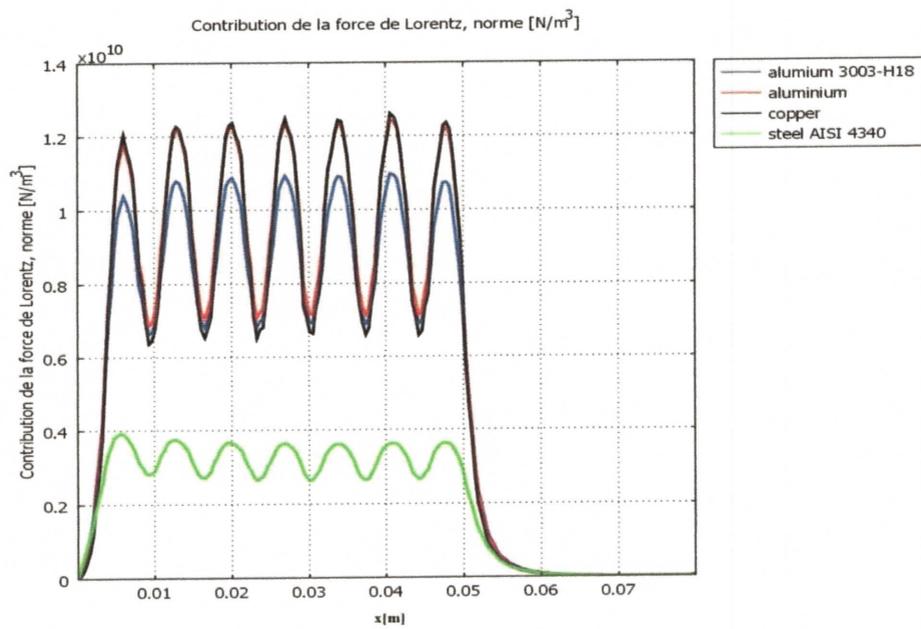


Fig.III.13 : Forces de Lorentz le long des plaques avec différents matériaux

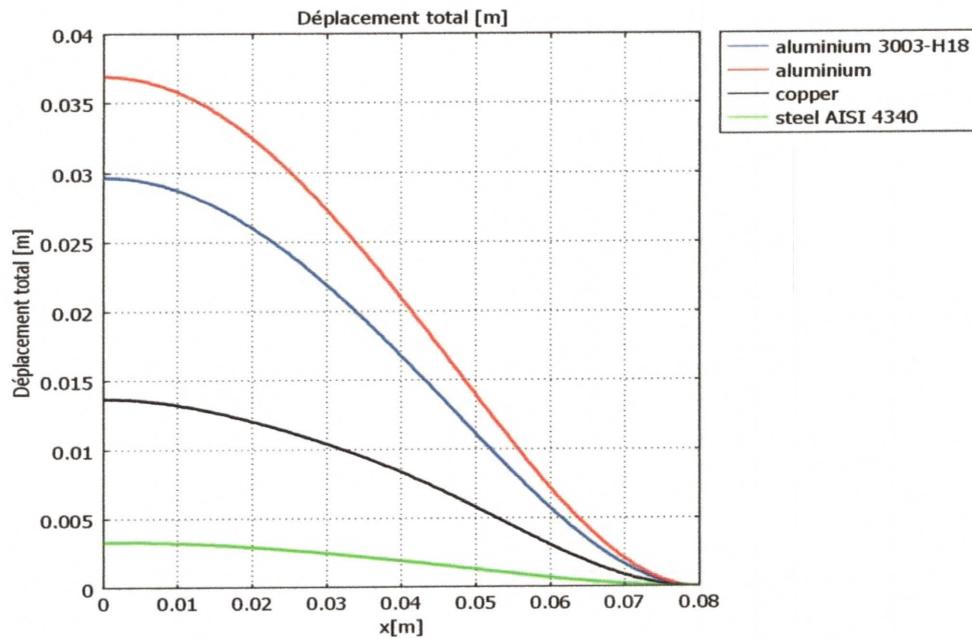


Fig.III.14 : Déplacement total à  $t = 300 \mu s$  pour différents matériaux

### III.2.6. Effet de la forme de la bobine

Un dernier paramètre de l'installation de l'emboutissage de plaques est celui de la forme de la bobine de formage.

En effet, afin d'étudier l'effet de la forme de la bobine sur le formage des pièces, nous avons considéré trois inducteurs avec les mêmes dimensions que précédemment mais avec des spires rectangulaires (application précédente), carrées ou circulaires (fig. III.15). Le même courant de décharge est considéré.

Les forces calculées créées par les trois différentes bobines ne sont pas très différentes, mais elles sont plus importantes avec une bobine à spires carrées et plus faibles dans le cas de spires circulaires (fig. III. 16).

Cependant, les déformations sont identiques avec bobines carrées ou rectangulaires et plus importantes que celle des bobines circulaires.

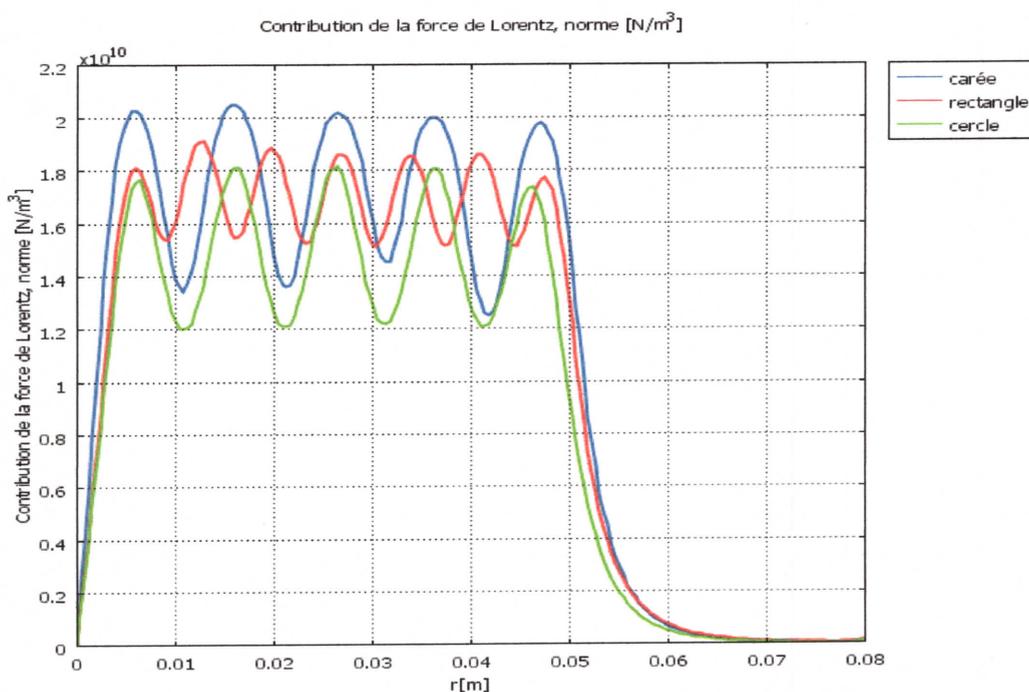


Fig.III.15 : Forces de Lorentz créées par différentes bobines

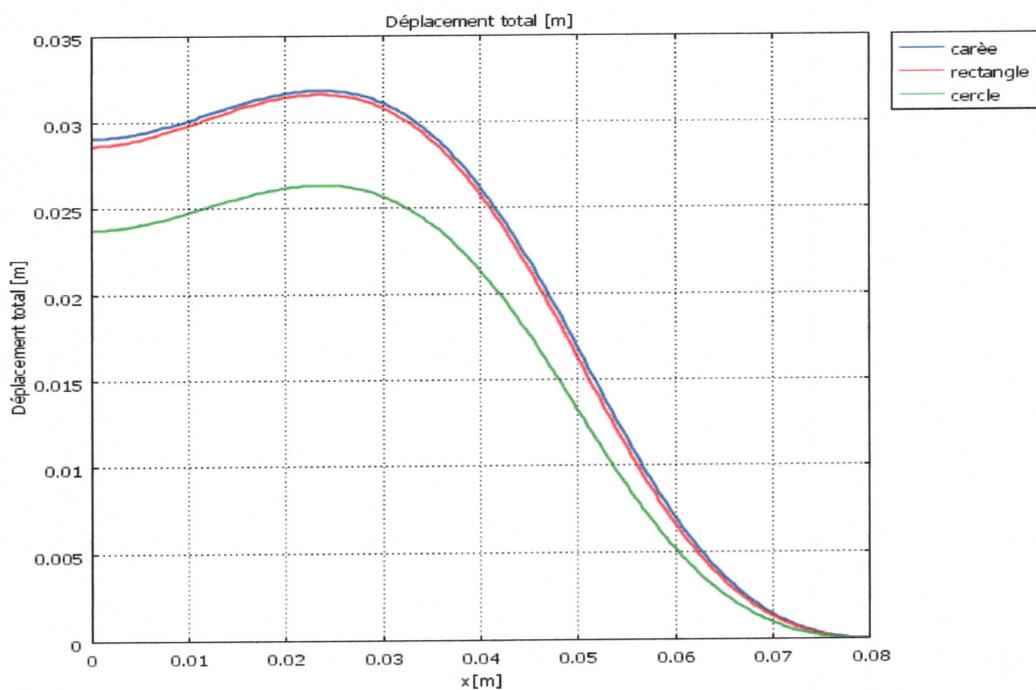


Fig.III.16 : Emboutissage de plaques par bobines carrée, rectangulaire et circulaire

### III.3. 2<sup>ème</sup> application : Fléchissement avec inducteur massif

Une autre application industrielle est celle du fléchissement dit « Bending » en anglais, qui est beaucoup utilisée dans plusieurs industries (industrie automobile, industrie agroalimentaire, applications endoscopiques ... [33]).

Un exemple simple de fléchissement est celui montré sur la figure III.15 où une plaque en aluminium, de diamètre 160mm, d'épaisseur 1mm est fléchie à l'aide d'un inducteur plat massif en cuivre, situé au dessous des 30mm du coté gauche de la pièce. Celle-ci est fixée sur le reste de sa longueur (50mm). L'interface entre l'inducteur et la plaque est de 1mm.

Le fléchissement de la plaque (fig. III.16) obtenu numériquement est prévisible et reflète bien la distribution des forces de Lorentz (fig. III.17) appliquées sur la pièce fléchie.

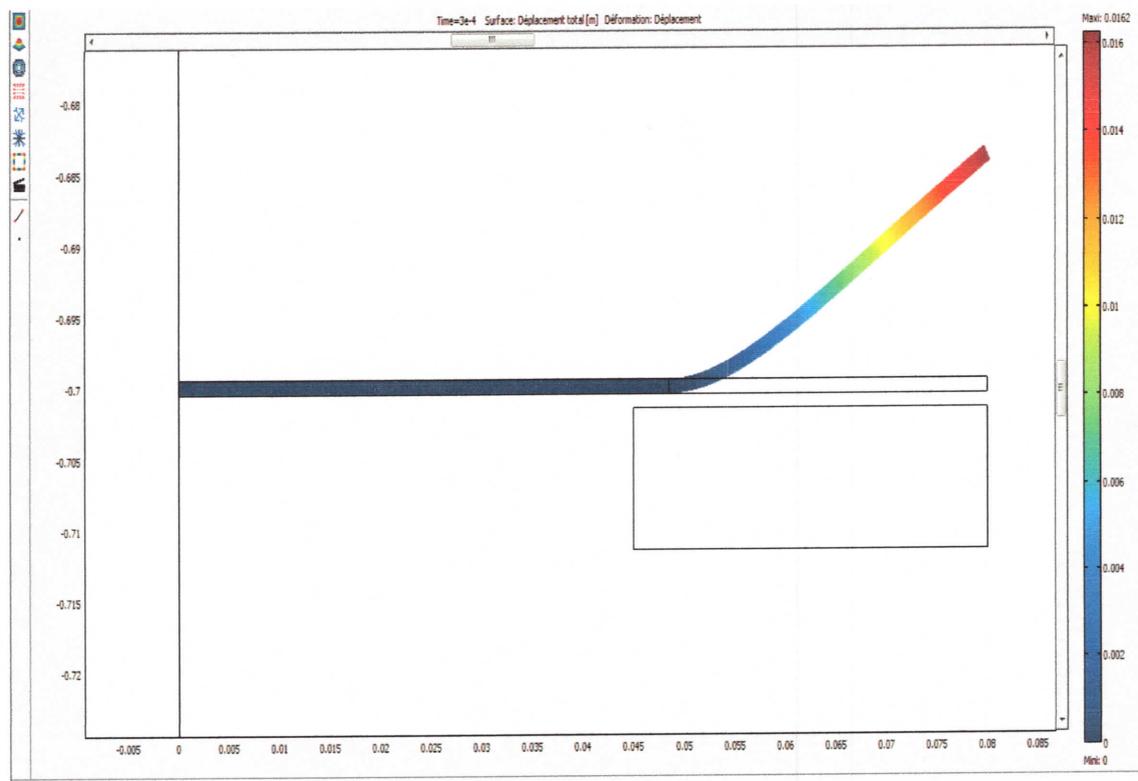


Fig.III.17: Système de fléchissement

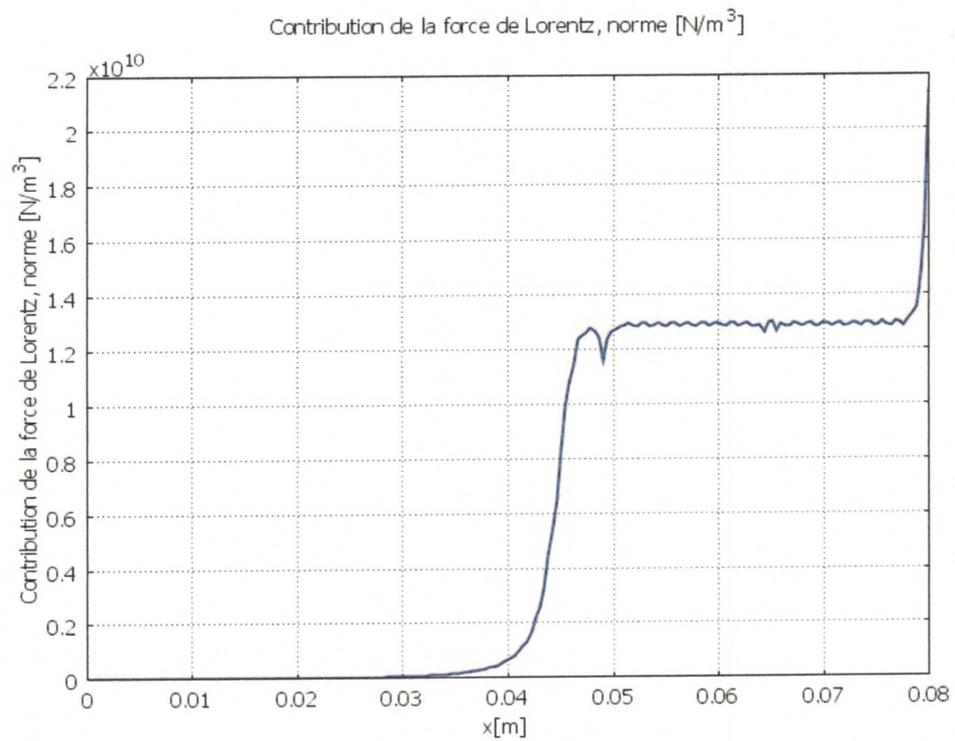


Fig.III.18 : Forces de Lorentz dans le cas de fléchissement

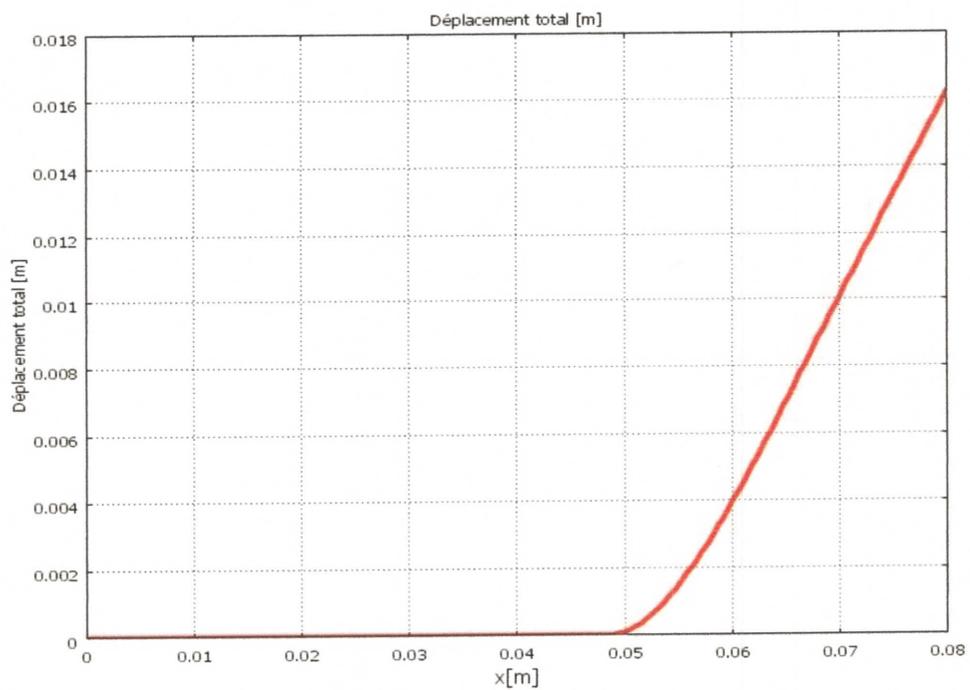


Fig.III.19: Fléchissement de la plaque

### III.4. Cas d'une rupture de la plaque

Dans le cas où on diminue l'interface inducteur pièce (0.5 mm) (fig. III.20), nous avons obtenu un résultat très impressionnant (fig. III.21), la forme de la plaque n'est pas uniforme, et un petit défroissement est remarqué au niveau du point ( $r = 0.035$  m). La plaque en ce point semble se prêter à la rupture.

Pour essayer d'expliquer ce résultat, nous avons examiné de plus près le comportement mécanique de l'aluminium. La limite de l'aluminium à la rupture  $R_m$  est de: 140 -180 Mpa (selon la norme ISO) [35].

Cependant, d'après la Figure III.22, la contrainte de Tresca en ce point est de 235 Mpa, supérieur à  $R_m$  donc il se produit une instabilité plastique qui peut se manifester comme une fissure, une dilatation ou une rupture [35].

Ce résultat intéressant permet de mettre en évidence les limites du processus de formage magnétique.

Pour éviter ce phénomène de froissement qui peut même entraîner la rupture de la pièce, la contrainte doit être diminuée et cela, en agissant sur les paramètres de l'installation en particulier :

- Diminuer l'énergie du générateur de formage
- Augmenter l'interface inducteur-pièce à former
- Augmenter l'épaisseur de la plaque.

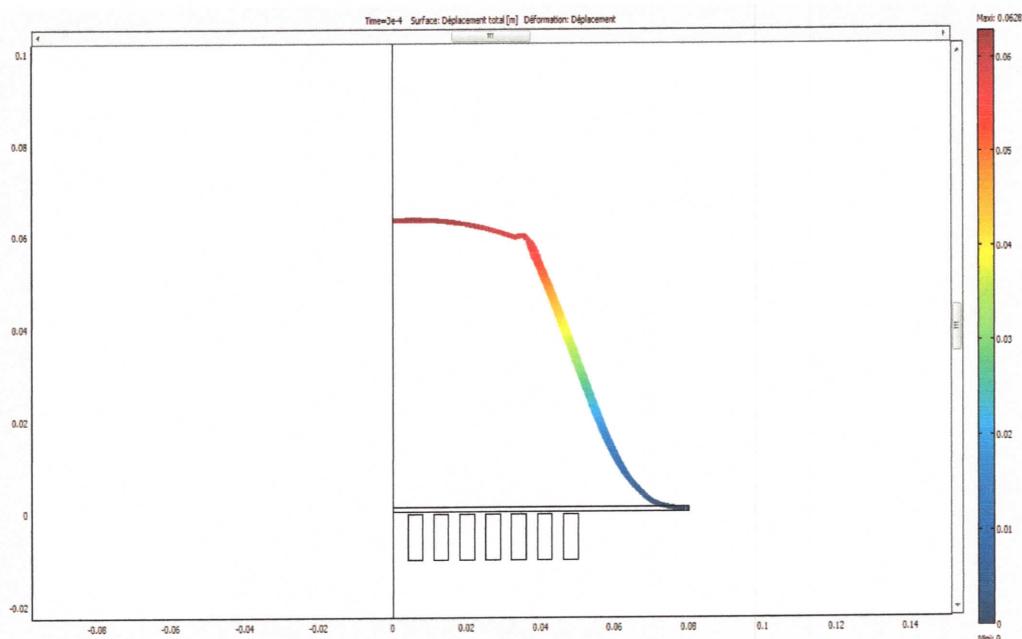


Fig.III.20 : Système d'emboutissage avec rupture

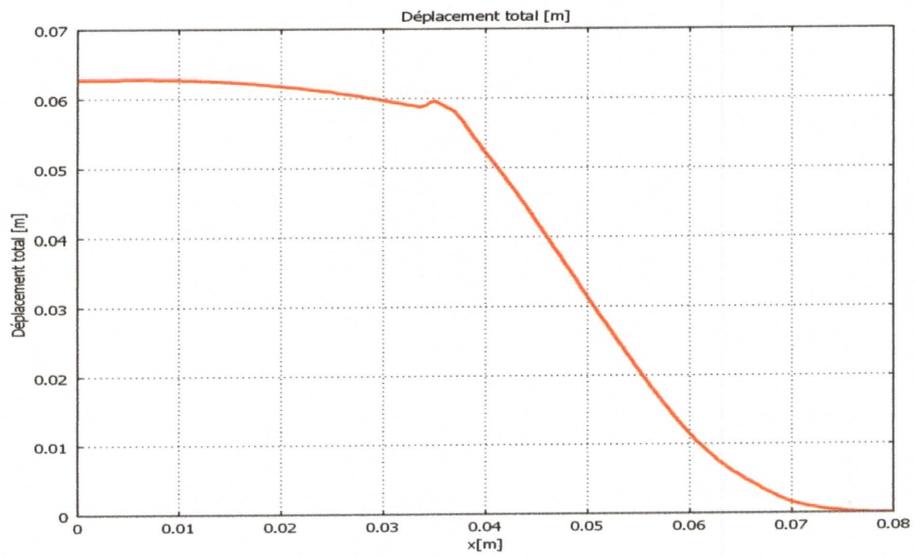


Fig.III.21 : Déformation de la plaque avec rupture

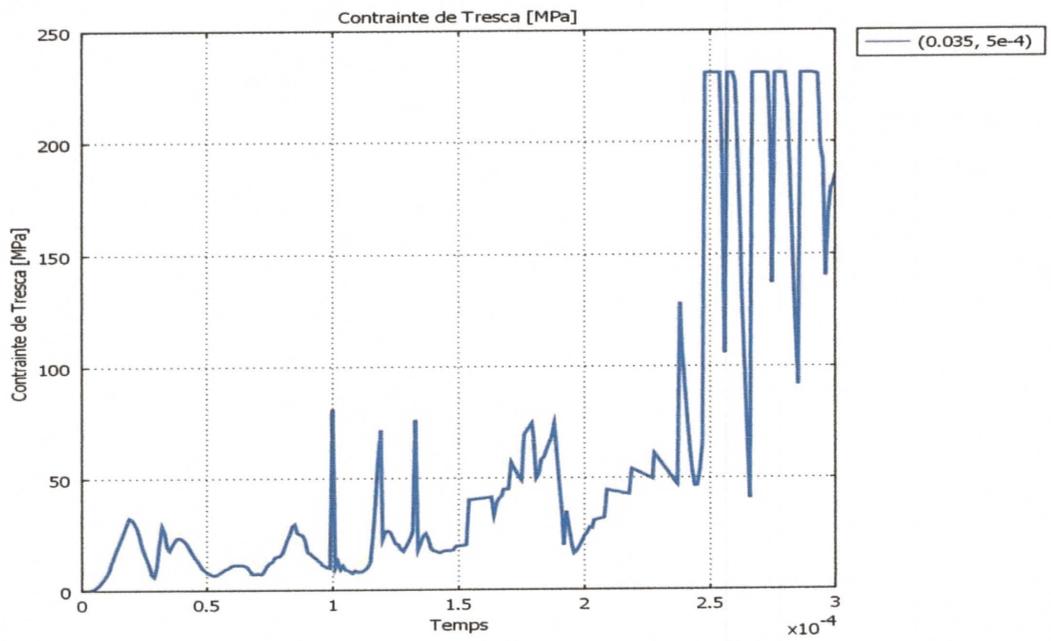


Fig.III.22 : Contrainte de Tresca au point d'instabilité

### III.5. compression de tubes

Parmi les applications très utilisées du FEM, on trouve les systèmes d'expansion et compression de tubes [31].

#### III.5.1 Inducteur massif

Le système de compression considéré dans notre travail est une installation industrielle (fig. III. 23) composée d'un tube en aluminium, de diamètre intérieur 3mm et une hauteur de 60 mm, introduit à l'intérieur d'un inducteur massif en cuivre d'une section de  $41\text{mm}^2$  [31].

Nous avons utilisé trois temps différents pour trouver la déformation désirée. D'après la figure III.24, nous remarquons que le meilleur temps est  $t=16\mu\text{s}$ , il permet d'avoir la compression optimale du tube, cela est expliqué par les forces de Lorentz, qui sont plus importantes correspondante à ce temps (fig. III. 25).

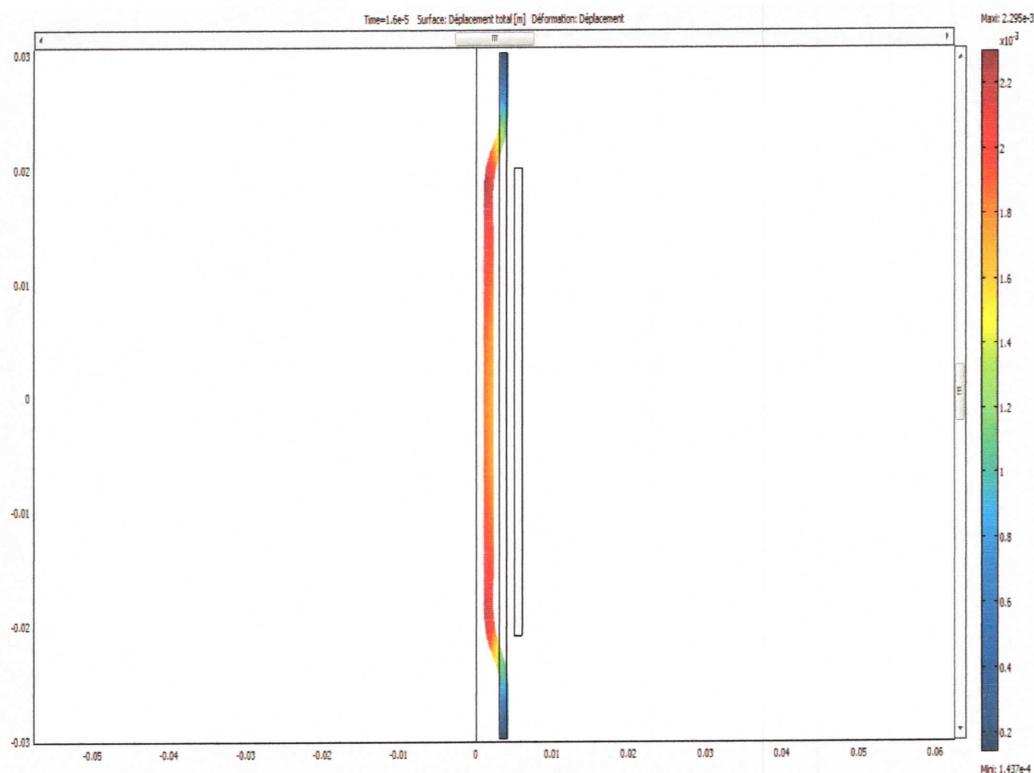


Fig.III.23: Système de compression avec inducteur massif

Les paramètres physiques et géométriques de cette installation sont :

<b>Bobine</b>	Section de l'inducteur	$4,1 \cdot 10^{-5}$ mm
	Rayon extérieur de l'inducteur	9mm
	Conductivité	$5,998e7$ [S/m]
	La perméabilité	$4 \cdot \pi \cdot e-7$ H/m
<b>Charge</b>	Rayon extérieur de tube	4mm
	Epaisseur de tube	1mm
	Conductivité	$3,774e7$ [S/m]
	La perméabilité	$4 \cdot \pi \cdot e-7$ H/m
<b>Générateur</b> <b>8.4KV</b>	Résistance R	$1,53$ mΩ
	Inductance L	$L=0,193$ μH
	Capacité C	$C= 1080$ μF

Tableau III.3 : paramètres du système de compression

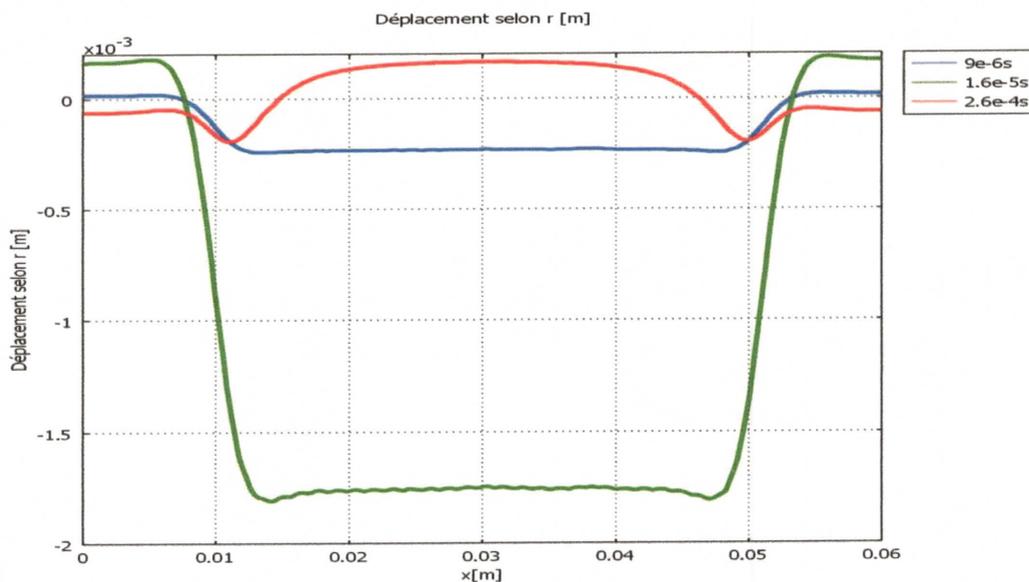


Fig.III.24 : Compression du tube dans trois temps différents

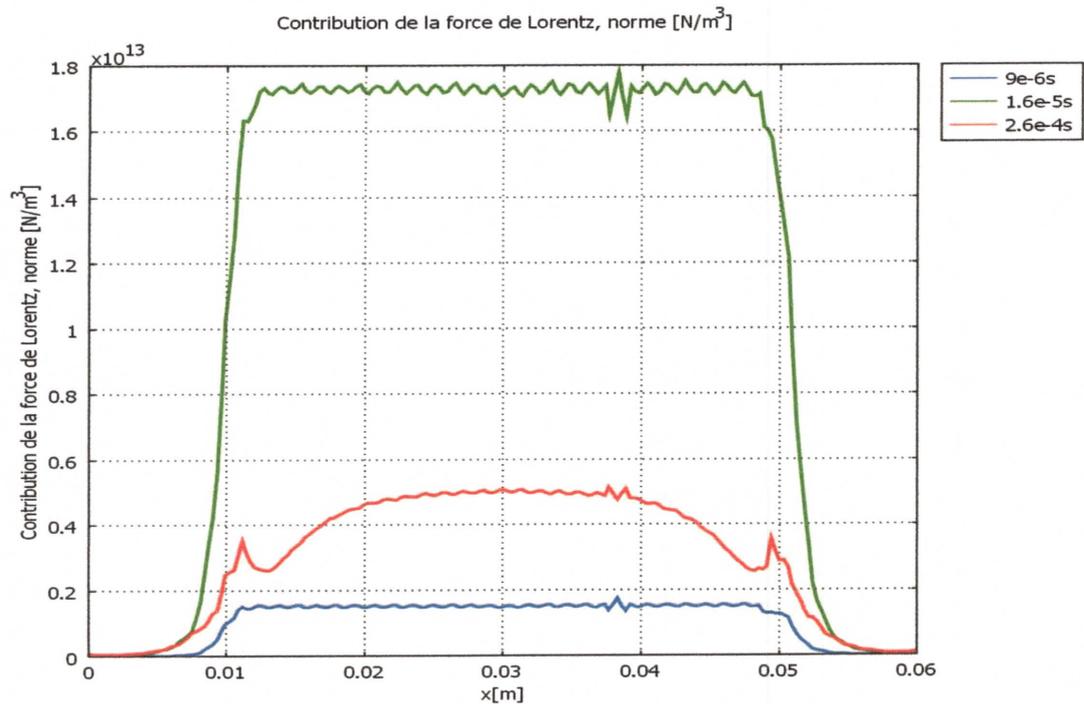


Fig.III.25: Contribution de la force de Lorentz



### III.5.2 Avec concentrateur

Afin de montrer le rôle du conformateur de champ (concentrateur), dans le système précédent, un conformateur de champ a été introduit entre le tube à comprimer et l'inducteur massif, pour donner au tube une forme bien déterminée [31].

Avec le même courant, et en présence du conformateur, la forme obtenue (fig. III. 26) montre bien que le conformateur de champ a fait changer la forme du tube. Les deux points (a) et (c) montrent la plus faible compression, contrairement au point (b) qui possède la plus forte compression. Les mêmes remarques peuvent être faites pour les forces de Lorentz et les densités de flux magnétiques en ces points (fig.III.27-28). Cela est évidemment dû à la forme du conformateur.

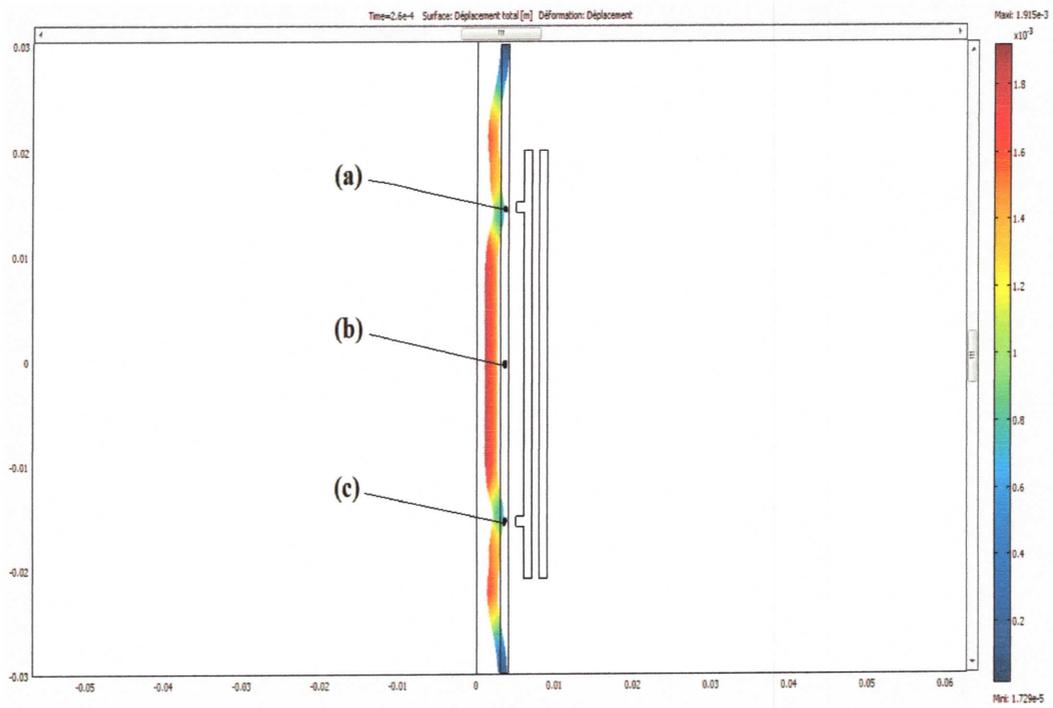


Fig.III.26 : Système de compression avec conformateur du champ

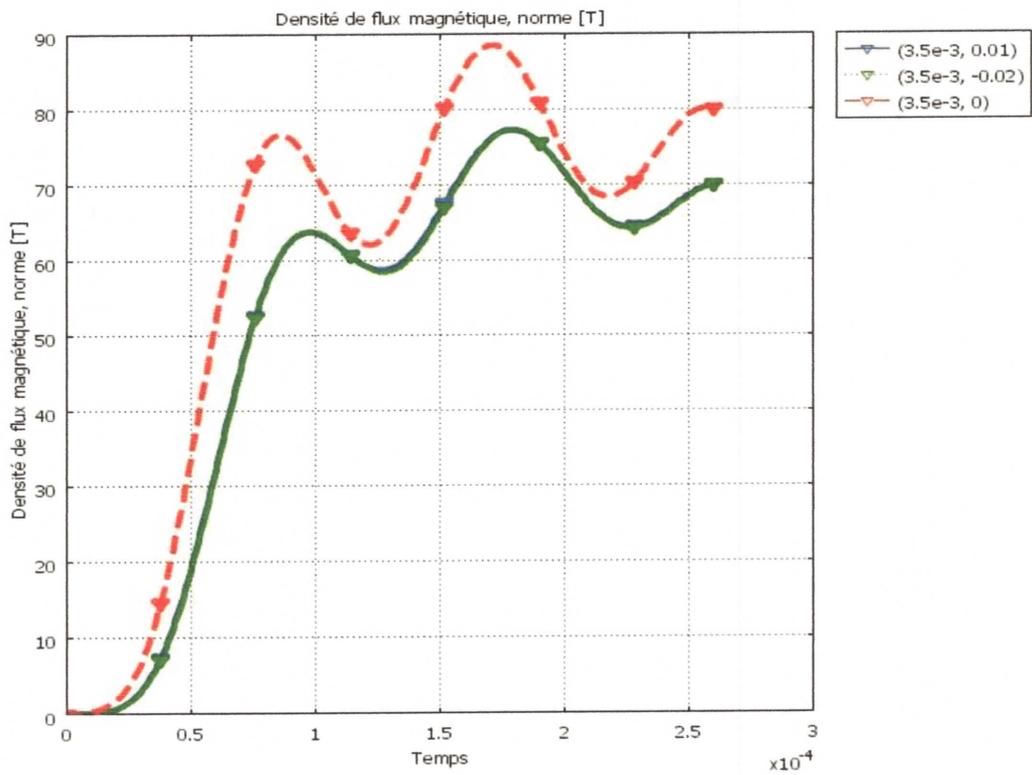


Fig. III.27 Densité de flux magnétique

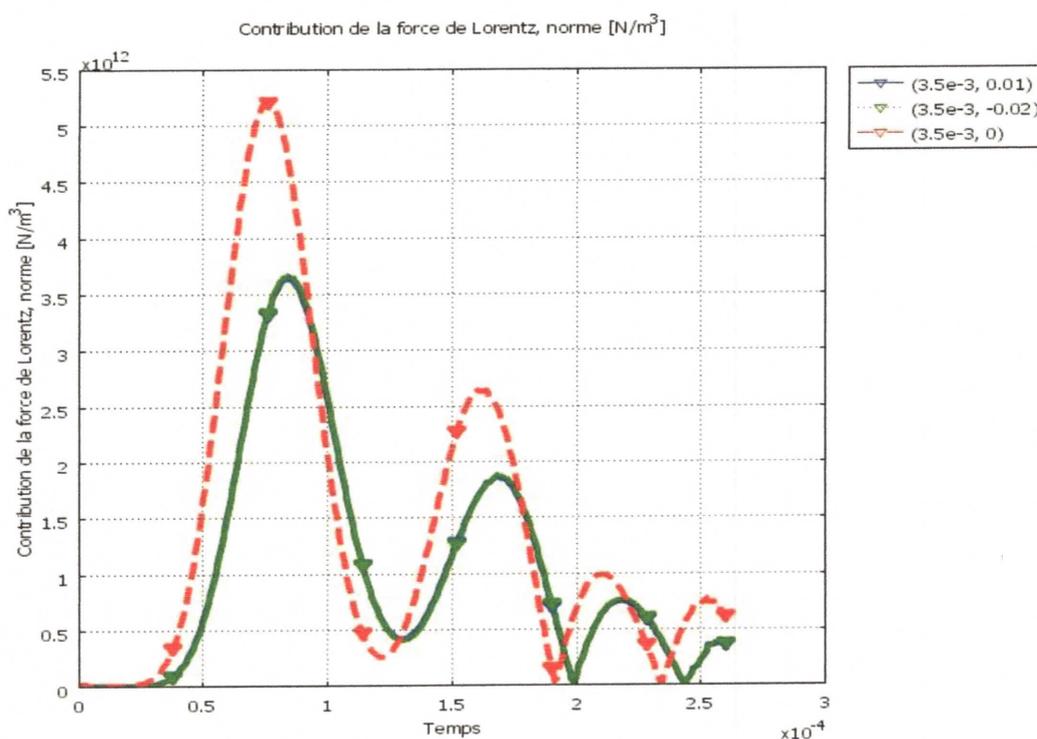


Fig.III.28 : Contribution de la force de Lorentz

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un outil numérique qui permet le calcul, de manière précise, aussi bien les grandeurs électromagnétiques, comme la densité du flux magnétique, les courants induits et les forces électromagnétiques, que les grandeurs mécaniques, en particulier la déformation. Ces grandeurs sont nécessaires pour la compréhension du processus de formage magnétique. Ce modèle numérique utilisant un couplage fort entre les différents phénomènes mis en jeu, a été utilisé pour la simulation de plusieurs applications industrielles et expérimentales pour l'emboutissage de plaques, la compression de tube ainsi que l'utilisation de conformateur de champ. Les résultats de simulation sont en agrément avec ceux trouvés expérimentalement, disponibles dans la littérature.

Les résultats numériques ont montré que les forces électromagnétiques sont intenses, surtout aux premiers instants et diminuent rapidement avec le temps. Elles sont concentrées au niveau des plus faibles interfaces bobine-pièce. C'est-à-dire dans les parties face aux spires de la bobine.

D'autre part, dans les processus industriels, l'étude de l'effet des paramètres géométriques et physiques des installations est inévitable. Dans ce chapitre, l'analyse des paramètres du processus d'emboutissage par impulsion magnétique a été réalisée. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Plus les conductivités électriques sont importantes, plus, les courants induits, les forces de Lorentz et par conséquent la déformation de la plaque sont importantes.

- L'épaisseur de la plaque influe sur le flux du champ magnétique durant le processus. La déformation totale est donc plus faible pour les pièces épaisses. Cependant, les pièces très minces peuvent montrer des froissements qui peuvent entraîner la rupture et la cassure de ces pièces.

- La distance entre les bobines de formage et les pièces à former joue un rôle major dans le processus de magnétoformage. Dans le cas où l'inducteur est très rapproché de la plaque, la pression magnétique et par conséquent la déformation sont plus grande. Dans certains cas une rupture de la pièce peut avoir lieu.

Dans ce chapitre, les modèles numériques développés ont été utilisés pour mettre en évidence les effets de différents paramètres du processus de formage en particulier, l'effet du conformateur de champ dans le cas de compression de tube utilisé dans l'industrie. Les résultats obtenus sont satisfaisants du point de vue de leur comparaison avec ceux trouvés expérimentalement.



# Conclusion Général

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### Conclusion

Notre objectif visait à modéliser numériquement la mise en forme de pièces industrielles par le formage électromagnétique.

Pour atteindre notre objectif, comme première étape, une recherche bibliographique a été menée et nous permet de nous familiariser avec le procédé de FEM et de maîtriser les phénomènes mis en jeu pour pouvoir entamer la seconde partie qui consiste au développement de modèles numériques permettant la simulation de plusieurs applications industrielles de formage par impulsion magnétique. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation de l'environnement COMSOL, ce dernier grâce à ses avantages (logiciel permettant le couplage fort de plusieurs modèles multi physiques) nous a permis d'étudier et d'analyser diverses applications industrielles utilisant ce processus.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et en bonne concordance avec ceux trouvés expérimentalement.

A la fin, plusieurs conclusions peuvent être tirées:

- Ce procédé de FEM est utilisé pour le formage de tôles ou de tubes métalliques électriquement conducteurs. L'aluminium semble être le matériau le plus prometteur avec ce processus, il offre le plus d'avantages grâce à son comportement mécanique sous l'effet des forces électromagnétiques.
- L'interface bobine-pièce est un paramètre majeur dans ce processus de déformation.
- La diffusion du champ magnétique est plus faible lorsque l'épaisseur est plus élevée, c'est ce qui explique l'utilisation des pièces minces dans le formage magnétique.
- Un autre paramètre important est la tension de charge où plus exactement l'énergie du générateur de formage..
- les niveaux des déformations plastiques effectives sont globalement plus élevés dans le FEM.
- Le froissement et donc la rupture des pièces formées par impulsion magnétique peut être évité en agissant sur les paramètres géométriques et physiques de l'installation utilisée.

Globalement, une large base de données a été développée à travers cette étude, qui peut devenir une base pour des études futures.

### **Perspectives**

A l'avenir, certaines améliorations dans la modélisation du formage magnétique, peuvent être menées. Tout d'abord, il convient de mentionner que, bien que notre modèle numérique reproduise efficacement les résultats expérimentaux, certains phénomènes physiques qui ont été négligés dans nos simulations (par exemple l'effet de l'inductance mutuelle) pourraient donner de meilleurs résultats.

En outre, nous observons que notre modèle peut aussi être étendu aux applications tridimensionnelles. Il serait intéressant, de développer un modèle tridimensionnel similaire pour les applications industrielles. De nombreux procédés de formage sont souvent non axisymétriques et sont mieux traités dans un environnement tridimensionnel.

Différentes géométries complexes peuvent être testées pour valider les capacités de nos modèles numériques pour les applications industrielles.

L'étude numérique réalisée nous a permis de faire une analyse du processus de FEM et des phénomènes mis en jeu. D'autres recherches peuvent être poursuivies pour acquérir des connaissances profondes de la dynamique de déformation. Cette étude marque la voie à des études plus détaillées sur les différents aspects de ce processus de FEM. De nouveaux domaines de recherche sont ouverts pour exploration.

## Bibliographie

- [1] Hafsaoui, I, "Étude et Modélisation numérique Tridimensionnelle des Effets Mécaniques du Champ Electromagnétique", thèse de doctorat de l'université du Jijel, 2009
- [2] Y.cherighen , B.Fredj " Etude numérique du comportement d'une plaque soumise à un champ électromagnétique " projet de fin d'études , Bejaia 1998
- [3] B.Benjima " contribution à la modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétiques relatifs au magnétoformage " thèse de doctorat, option : génie électrique, I.U.T de Saint-Nazaire, novembre 1997
- [4] T. Heuzé 1 , A. Leygue 1 , G. Racineux 1 , F. Chinesta 1 ."Modélisation paramétrique d'un inducteur de magnétoformage par la Proper Generalized Decomposition".11e Colloque National en Calcul des Structures 13-17 Mai 2013
- [5] LZROY, M .RENAUD, J., 1980, *Technique de l'ingénieur .Génie mécanique*, Paris, France.
- [6] R. DAVIS, E. R. Austin, "Developments in high speed metal forming ", Industrial press Inc, 1970.
- [7] Cabrol Jean-Claude., 1989, "*Technique de l'ingénieur .Génie mécanique*", Paris, France.
- [8] Siddiqui, M, 2009, "Numerical Modeling and simulation of Electromagnetic Forming Process", thèse de doctorat de l'université du Strasbourg,
- [9] : Thèse de Doctorat, Mécanique Avancée, Aurore Guglielmetti, " Etude numérique du soudage par impulsion magnétique", UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI
- [10] Vincent, R, " de la modélisation numérique des procédés et du soudage en particulier au comportement mécanique des assemblages ", thèse de doctorat soutenue à Saint-Etienne, le 23 octobre 2009.

- [11] S. J. Salon, "Finite element analysis of electrical machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [12] J.A.Tagopoulos, E.E.Krieziss, "Eddy current in linear conducting media", Elsevier, 1985.
- [13] M.Leroy, J, Y.renoud AR.M.E.C.A, "Bobines pour champ magnétiques intenses" Brevet N°75 35 401.19 Novembre 1975
- [14] "Le brasage par induction". Le processus d'assemblage le plus productif.
- [15] Source : [www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnetique](http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnetique)
- [16] Ir. Koen Faes, "Amélioration de la productivité par des techniques de soudage avancées", Institut Belge de la Soudure.
- [17] B.Bendjima, "contribution à la modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétique relatifs au magnétoformage ", thèse de doctorat, saint Nazaire 1997.
- [18] S. Kallee, R. Schäfer, P.Pasquale.The industrial use of EMPT. "State of the art and future applications". International Conference and User Meeting.22 Avril 2010, Alzenau, Allemagne.
- [19] C. Beerwald, A. Brosius, M. "Kleiner.Fügen durch impuls magnetische Umformung. (uniquement disponible en allemand) ".Proceedings of 6. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik SFU,27.-28.11.1999, Dresde, Allemagne,p 411-423
- [20] Vincent.R, J.Bergheau, E.Feulvarch,"Modélisation tridimensionnelle du procédé de Mise en forme électromagnétique", CONFERENCE PAPER·MAY2000
- [21] M.Zaouia , " Modélisation Numérique du Couplage Electromagnétique –Mécanique dans les structures Linéaires Tubulaires ",magister de l'EMP d'alger,05 mai 2013.
- [22] Yousef Boutora, "Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique de machines synchrones à aimants permanents avec la méthode des éléments finis", Thèse de Doctorat, En Sciences en Génie Electrique Option : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

- [23] M. Benzi "Preconditioning Techniques for Large Linear Systems: A Survey", Journal of Computational Physics N°182 (2002) pp. 418 - Ail.
- [24] Ramon Bargallo, "Elements for electrical engineering", Electrical Engineering Department, Universitat Politecnica De Cataunya, 2006
- [25] M'hemed Rachek, " Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non-destructif par courants de Foucault ". Thèse de Doctorat en Sciences spécialité: Electrotechnique, Option machines électriques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007.
- [26] B. M. Irons, "A frontal solution program for finite element analysis", International Journal for Numerical Methods in Engineering 2, pp. 5-32 (1970).
- [27] Thomas Henneron, " Contribution à la prise en compte des Grandeurs Globales dans les Problèmes d'Electromagnétisme résolus avec la Méthode des Eléments Finis", Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Décembre 2004.
- [28] G. Dhatt et D.Touzot " Une présentation de la méthode des éléments finis", Edition Maloine, Paris, 1984.
- [29] "COMSOL Multiphysics 5.2 Release Highlights\_" (consulté le 23 janvier 2016), cité dans [https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics) ,consulté le 05/03/2016.
- [30] P. Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft, " Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical Thermal Electromagnetic Simulations"
- [31] P. Zhang, M. Kinchi, H. Shao, J. E. Gould, and G. S. Daehn, "Analysis of the electromagnetic impulse joining process with a field concentrator".

[32] N.Takatsu, M.Kato,K.Sato,T.Tobe , "High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force ",JSME International Journal,Vol.31,NO.1

[33] Manish Kamal, "Uniform pressure electromagnetic actuator for forming flat sheets", Dissertation, Ohio state University, 2005.

[34] les vernus à l'acétate de cellulose, consulté 05/09/2010

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_d%27aluminium\\_pour\\_corroyage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage).

[35] J-P.BAILON,J-M.DOLOT,2000, *Des matériaux* ,Ecole Polytechnique de Montréal.,pp.142-148,1988.

## **RESUME**

Notre travail vise à modéliser numériquement la mise en forme de pièces industrielles par impulsion électromagnétique. Lors du formage électromagnétique, une bobine est placée à proximité de la pièce à déformer, et une décharge de courant très puissante est envoyée à travers cette dernière. Le champ magnétique alors créé des forces intenses provoquant le passage du métal à un état élastoplastique durant une fraction de seconde, état qui lui permet d'épouser parfaitement le moule devant lui donner sa forme définitive.

Pour atteindre notre objectif nous avons opté pour un modèle numérique, intégrant un couplage fort entre les équations électromagnétiques et mécaniques.

Nous avons eu recours au logiciel de simulation numérique multi physique: **COMSOL** basé sur la méthode des éléments finis pour étudier diverses installations industrielles.

Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux trouvés expérimentalement.

## **ABSTRACT**

Our research attempts to digitally model the layout of industrial parts by the electromagnetic forming. When forming by the magnetic pulse, a coil is placed near the sheet to be deformed, and a very powerful discharge current is passed through it.

The magnetic field then causes, intense force, causing the passage of the metal to an elastoplastic state for a split second; such state allows it to fit perfectly into the mold and, hence, give it its final shape.

To reach the objectives of our study, a strong numerical coupling between the electromagnetic and mechanical equations has been opted along this research.

We have resorted to use the numerical multi physics simulation software: **COMSOL**, based on the finite element method, to study different industrial plants.

The results obtained are in good agreement with those found experimentally.