

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**

**Spécialité : Electromécanique**

## **Thème**

**Etude et Analyse du Processus de Formage par Champ  
Électromagnétique de Pièces Métalliques**

par :

**Mr. Oussema ZEGHAD**

Travail proposé et dirigé par :

**Mme. Habiba BALI**

**Dr. Ilhem HAFSAOUI**

**Promotion 2019**

# **REMERCIEMENT**

## **REMERCIEMENT**

*Tout d'abord, j'exprime mes remerciements à Dieu le tout puissant qui m'a guidé dans mon travail.*

*Mes profonds remerciements à mes encadreurs Dr. Habiba BALI et Dr. Ilhem HAFSAOUI chef de département d'électrotechnique à l'université de Mohamed Seddik Ben Yahia. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Dr. Habiba BALI pour la confiance qu'elle m'a accordé et pour l'intérêt qu'elle a constamment porté à mes travaux, aussi pour ses conseils et suggestions à travers de fructueuses discussions.*

*Mes remerciements s'adressent aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

# **Sommaire**

## Sommaire

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

### Chapitre. I : Le formage électromagnétique

#### Etat de l'art

I. 1. Introduction.....	2
I. 2. Principe du formage électromagnétique.....	3
I. 3. Les installations de formage électromagnétique.....	4
I. 3. 1. Générateurs de magnétoformage.....	4
I. 3. 2. Bobines de magnétoformage.....	5
I. 3. 3. Les caractéristiques nécessaires de bobinage FEM.....	6
I. 3. 4. Les Matrices.....	6
I. 3. 5. Conformateur de champ (concentrateur de champ) .....	7
I. 4. Utilisations et applications.....	8
I. 4. 1. Soudage .....	8
I. 4. 2. Assemblage .....	8
I. 4. 3. Formage.....	9
I. 5. Applications industrielles .....	11
I. 5. 1. Industrie Automobile.....	11
I. 5. 2. Aérospatiale.....	12
I. 5. 3. Les câbles .....	13
I. 6. Autres applications.....	13
I. 7. Conclusion .....	15

### Chapitre. II : Modélisation mathématique

#### du magnétoformage

II. 1. Introduction .....	16
II. 2. Equations électromagnétique .....	16
II. 3. Loi de comportement .....	17

a) Les relations des milieux .....	17
b) La loi d'Ohm .....	17
II. 4. Condition de passage .....	18
II. 5. Équation de diffusion électromagnétique .....	19
II. 6. Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques.....	19
II.7. Equations mécaniques .....	20
II. 7. 1. Equation d'équilibre .....	20
II. 7. 2. Relation déformation-déplacement .....	21
II. 7. 3. Relation contrainte-déformation.....	22
II. 8. Cas Elastoplastique .....	22
II. 9. Symétrie axiale .....	22
II. 10. Conditions aux limites.....	23
II. 11. Couplage modèle magnétique - modèle mécanique .....	23
II. 12. Conclusion .....	24

### **Chapitre.III : Applications et résultats**

III. 1. Introduction.....	25
III. 2. Applications d'emboutissage libre de plaques métalliques.....	25
III. 2. 1. Evolution temporelle du courant inducteur.....	27
III. 3. Calculs préliminaires : Emboutissage libre.....	30
III. 4. Formage de plaque avec matrice.....	34
III. 4. 1. Matrice hémisphérique.....	34
III. 5. Conclusion.....	39
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>40</b>

# **Introduction Générale**

## **Introduction Générale**

L'industrie cherche généralement à trouver des solutions pour augmenter la production au moindre coût, en fonction des besoins et par rapport au développement durable.

Avec le développement de l'industrie automobile, les chercheurs ont pris conscience de la nécessité de réduire le poids de la voiture, de réduire la combustion de carburant et de réduire le coût de la structure et de faciliter le processus de fabrication. On a découvert ainsi, que l'aluminium est l'un des métaux les plus intéressants en tant que métaux légers [1].

Pour former des tôles d'aluminium, les anciennes méthodes d'emboutissage posent plusieurs problèmes, car la formabilité d'aluminium est beaucoup plus faible que l'acier. Pour cela, les fabricants évitent d'utiliser l'aluminium pour former des pièces géométriques complexes.

Au fil du temps, ont été développées des techniques de mise en forme à grande vitesse pour des matériaux métalliques. Parmi ces techniques, on aborde dans ce travail le Formage Électromagnétique (FEM) ou encore Magnétoformage.

Le procédé de magnétoformage est une technique de mise en forme à grande vitesse pour les pièces métalliques électriquement conductrices (Aluminium, Cuivre, etc.). Cette technique a été développée à la fin des années 1960, a été utilisée dans plusieurs domaines industriels tels que l'automobile, l'aviation et plusieurs autres industries [2].

Le FEM est régi par des Équations aux Dérivées Partielles (EDP) décrivant les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques. Dans notre travail, on va réaliser un modèle numérique, avec couplage fort, des phénomènes électromagnétiques et mécaniques.

Pour résoudre ces équations (EDP) et pour la modélisation numérique du processus de magnétoformage on va utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5 qui est un logiciel de simulations numériques multiples qui prend comme méthode de calcul les éléments finis.

Dans notre travail, on va développer des modèles pour analyser et étudier l'emboutissage avec et sans matrice. Ce mémoire contient trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on explique les aspects théoriques et industriels du formage électromagnétique.

Dans le deuxième chapitre, on traduit la partie électromagnétique et mécanique pour le procédé de FEM sous la forme d'équations mathématiques.

Le troisième chapitre est consacré à effectuer et étudier des simulations pour des applications d'emboutissage, sur une plaque d'aluminium avec et sans matrice, à l'aide du programme COMSOL Multiphysics® 3.5.

Le mémoire est clôturé par à une conclusion générale résumant nos résultats.



# **CHAPITRE I**

## **Le Formage Électromagnétique**

### **Etat de l'art**

## Chapitre. I : Le Formage Électromagnétique

### Etat de l'art

#### I. 1. Introduction

Depuis la fin des années 60, la mise en forme à l'aide de champs magnétiques pulsés intenses, appelée Formage Électromagnétique (FEM) ou encore Magnétoformage, a été employée sur les matériaux à haute conductivité électrique [1], [2].

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 pulsé intense à travers une bobine se situant à proximité de la pièce à déformer [1].

Ce processus permet d'obtenir des nouvelles applications industrielles importantes dans le formage des métaux (Fig. I. 1), comme le soudage électromagnétique, l'assemblage et le pliage et la réalisation de pièces complexes. [1], [2], [3].

Ce chapitre résume l'état de l'art du processus du FEM à savoir l'aspect théorique et industrielle.

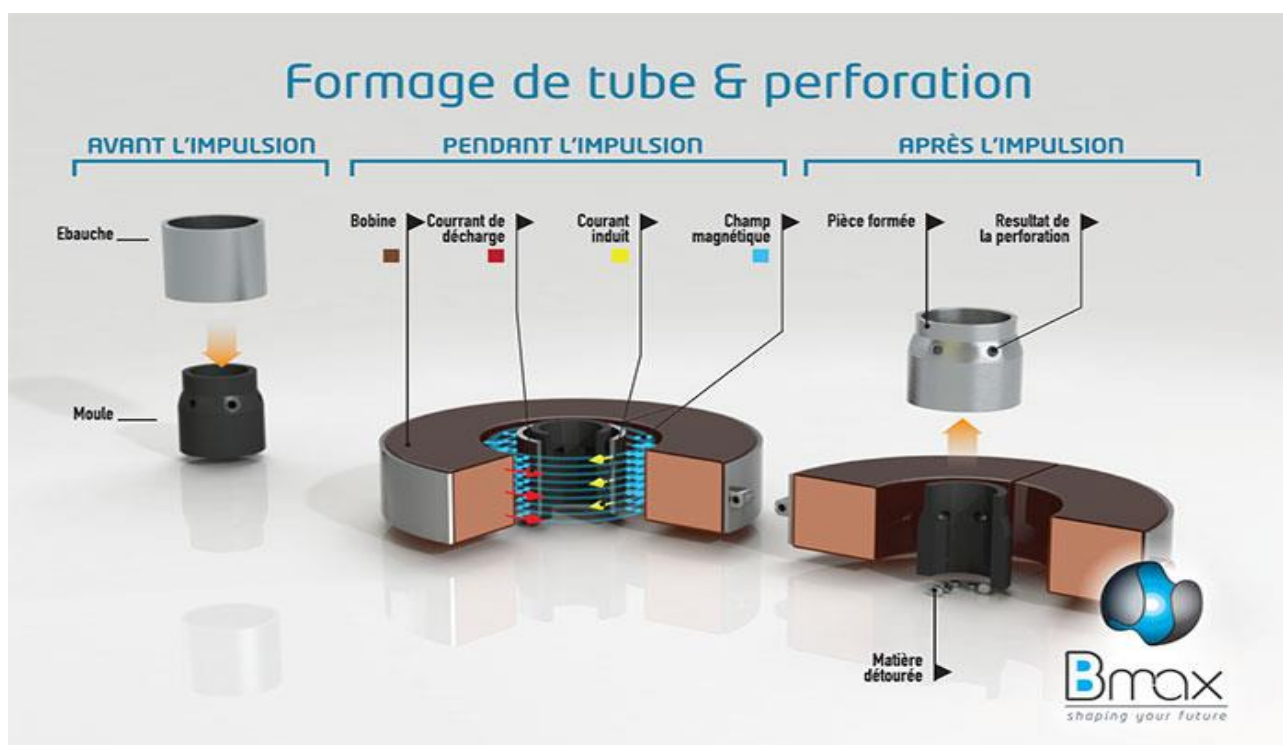


Fig. I. 1 : Formage de tube et perforation

## I. 2. Principe du Formage Électromagnétique [w1]

Le principe du magnétoformage utilise la force de Lorentz. Une bobine spécifique est placée près de la pièce métallique à transformer (Fig. I. 2). Une énorme impulsion de courant est envoyée à la bobine en déchargeant rapidement une batterie de condensateurs haute tension à l'aide d'un interrupteur. Cela crée un champ électromagnétique ultra puissant (par le biais de l'induction électromagnétique), oscillant rapidement autour de la bobine de travail.

Le courant induit crée un champ magnétique correspondant autour de la pièce conductrice. En raison de la loi de Lenz-Faraday, les champs magnétiques créés à l'intérieur de la pièce et de la bobine se repoussent fortement l'un l'autre.

L'impulsion magnétique et l'extrême vitesse de déformation transforme le métal en un état viscoplastique, augmentant la formabilité sans nuire à la forme d'origine du matériau, ce qui lui permet d'épouser parfaitement le moule devant lui donner sa forme définitive. L'intérêt de ce procédé réside donc dans la précision qui en résulte, ce qui intéresse notamment les industriels en termes de design.

Par ailleurs, la viscoplasticité permet d'améliorer les limites mécaniques des matériaux : Le fort courant de la bobine (typiquement quelques dizaines ou centaines de milliers d'ampères) crée des forces magnétiques ultra-puissantes qui dépassent facilement la limite d'élasticité de la pièce de travail, provoquant ainsi une déformation permanente. Par exemple, l'élasticité de l'aluminium, normalement de 20 %, a pu être portée à 50 % environ.

Le processus de formage des métaux se produit très rapidement (généralement quelques dizaines de microsecondes) et, en raison de la grandeur des forces, des portions de la pièce subissent des accélérations pouvant atteindre 300 m/s [4], [5].

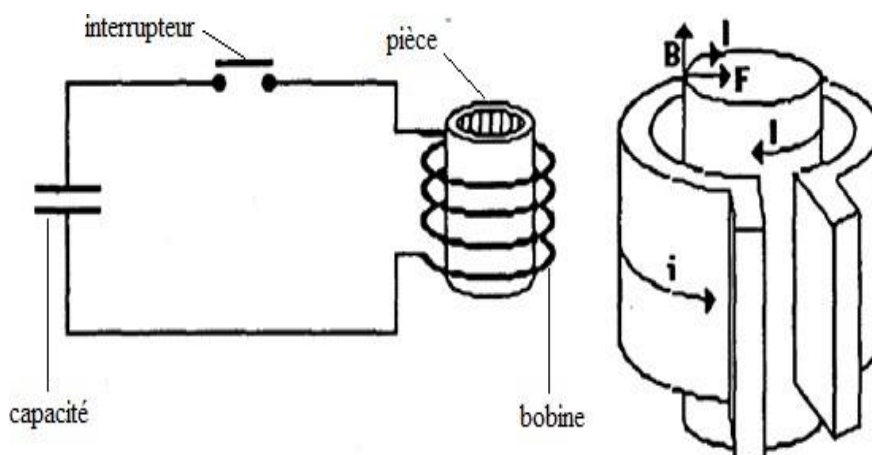


Fig. I. 2 : Schéma représentatif du processus du FEM [6]

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 être formée [2], [3].

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

### I. 3. Les installations de Formage Electromagnétique

Une installation de FEM est constituée généralement de (Fig. I. 4) :

- Un générateur constitué de plusieurs condensateurs ;
- Un circuit de charge du banc de capacité et un circuit de décharge ;
- Un interrupteur du circuit de décharge ;
- Une bobine dont la géométrie dépend de l'opération de formage ;
- Une pièce conductrice à former ;
- Une matrice qui donne la forme à la pièce.

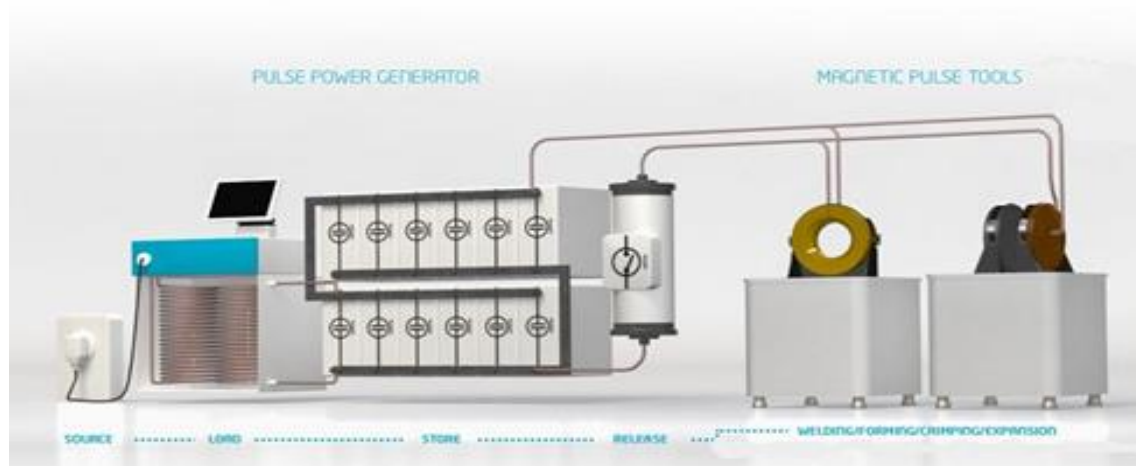


Fig. I. 4 : Installation de FEM industrielle [6]

#### I. 3. 1. Générateurs de Magnétoformage

Les générateurs de Magnétoformage peuvent 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 (Fig. I. 5). Ces impulsions électriques sont obtenues par la décharge de condensateurs [2], [3], [4], [5].

L'énergie  $E$  qu'une batterie de condensateurs peut stocker est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (I.1)$$

$C$  : capacité de la batterie de condensateur.

$V$  : la tension de charge.

Exemples de valeurs standards pour les générateurs industriels :

- Energies : 8 KJ, 16 KJ, 32 KJ, 48 KJ, 64 KJ ;
- Tensions: 3 KV, 10 KV, 20 KV, 40 KV ;
- Méthodes de commutation : ignitrons ou éclateur ;
- Cadences : 10 Secondes, 30 Secondes et 60 Secondes.

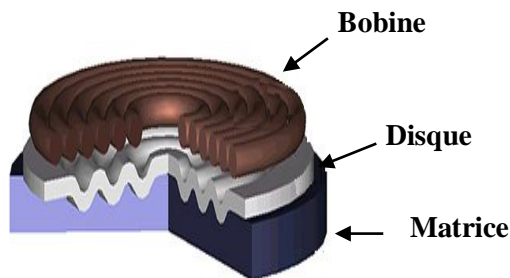


**Fig. I. 5: Générateurs de FEM**

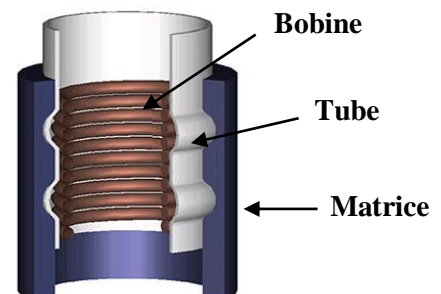
### I. 3. 2. Bobines de Magnétoformage [2], [4], [5], [w2]

Les bobines sont spécifiques à l'application choisie, on distingue plusieurs catégories:

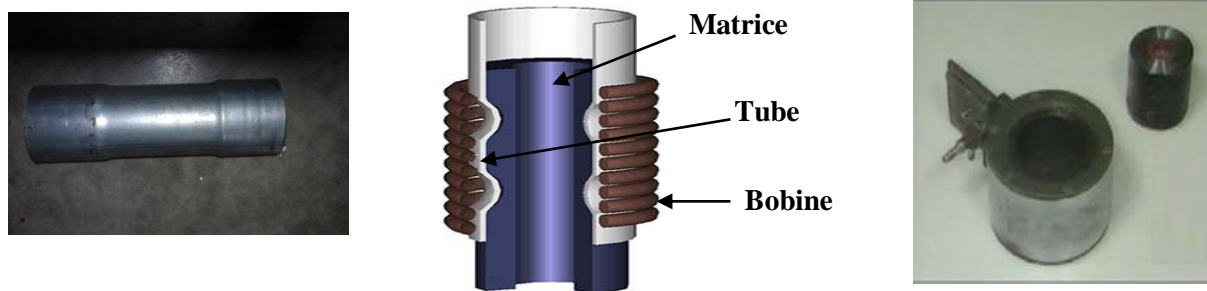
- Bobine plate utilisée en formage des tôles métalliques (Fig. I. 6).
- Bobine hélicoïdale utilisée pour l'expansion des tubes (Fig. I. 7).
- Bobine de compression : semblable à celle d'expansion cependant, elle entoure le tube à comprimer (Fig. I. 8).



**Fig. I. 6 : Emboutissage d'une tôle**



**Fig. I. 7 : Expansion d'un tube**



**Fig. I. 8 : Compression d'un tube**

### I. 3. 3. Les caractéristiques nécessaires de bobinage FEM :

Une bobine doit assurer [2], [4], [5] :

- 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.

Différentes géométries de bobines existent, on y trouve :

- Bobines plates ;
- Bobines mono-spires ;
- Bobines multi-spires ;
- Bobines simples ;
- Bobines en galette ;
- Bobines de designs spécifiques ;
- Concentrateurs de flux magnétique.

### I. 3. 4. Les Matrices :

La matrice sert essentiellement à la mise en forme des pièces (Fig. I. 9). En effet, la pièce à former est propulsée par l'effet des forces électromagnétiques et vient épouser la forme de la matrice placée à proximité de la pièce. Etant donné que le placage des pièces contre les matrices se



**Fig. I. 9 : Matrice progressive (ouverte) utilisée pour réaliser le logo de Toyota [w3].**

fait à haute vitesse, il est nécessaire d'utiliser, pour la réalisation des matrices, des matériaux résistants aux chocs.

En général, la matrice est un outil qu'on enlève à la fin de l'expérience. Mais dans certains cas, elle fait partie de la forme finale, c'est le cas lorsqu'on effectue du placage ou du soudage [2], [3], [5].

### I. 3. 5. Conformateur de champ (concentrateur de champ) [6]

La répétition de procédé du magnétoformage nécessite plusieurs bobines de différentes dimensions ; ce qui rend le coût de revient élevé. Pour éviter cela, l'idée de conformateurs de champs a été mise au point pour limiter le volume, dans lequel le champ se développe, au minimum utile lié au contour de la pièce (Fig. I. 10).

Au fait, le conformateur de champ électromagnétique est généralement un cylindre évidé en cuivre ou d'autre (par ex : béryllium ou alliages d'aluminium). Il s'intercale entre la bobine de champ et la pièce à déformer.

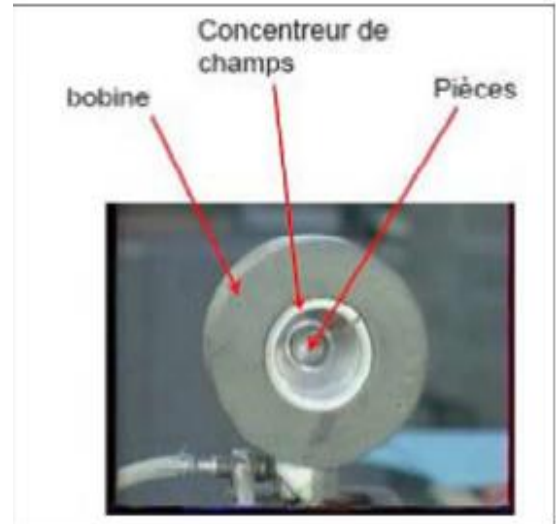


Fig. I. 10 : Conformateur de champs

Une fente verticale est usinée sur le conformateur dans le but d'éviter que ce dernier devienne un écran magnétique (blindage ou cage de Faraday). De ce fait, le champ magnétique s'étend jusqu'à la pièce à former tout en occupant un volume minimal comme le montre les figures ci-dessous (Fig. I. 11) et (Fig. I. 12).

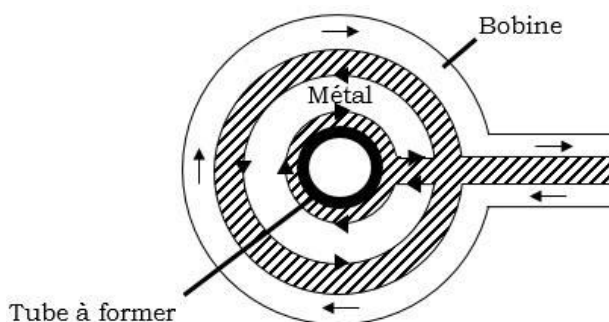


Fig. I. 11 : Conformateur de champ à courants résultants avec fonte

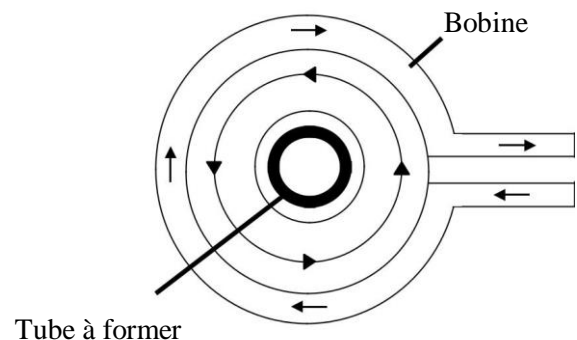


Fig. I. 12 : Conformateur de champ à courants résultants sans fonte

## I. 4. Utilisations et applications

Le Magnétoformage est utilisé dans la fabrication de pièces automobile, aviation, bâtiment et des centrales nucléaires [4], [7].

### I. 4. 1. Soudage [7], [8]

Le soudage à grande vitesse (ou soudage par impulsion magnétique) (Fig. I. 13 et Fig. I. 14), est l'un des procédés majeurs du FEM. Il est présent dans l'ensemble des secteurs industriels :

- le transport terrestre (automobile, ferroviaire, machines agricoles et de construction) ;
- les bâtiments et travaux publics (assemblage métallique) ;
- la construction navale (structures off-shore, navires, sous-marins) ;
- l'énergie (hydroélectricité, nucléaire, gaz et pétrole notamment, équipements électriques et électroniques) ;
- l'aéronautique.



**Fig. I. 13 : Noyau du système de soudage par impulsion magnétique**

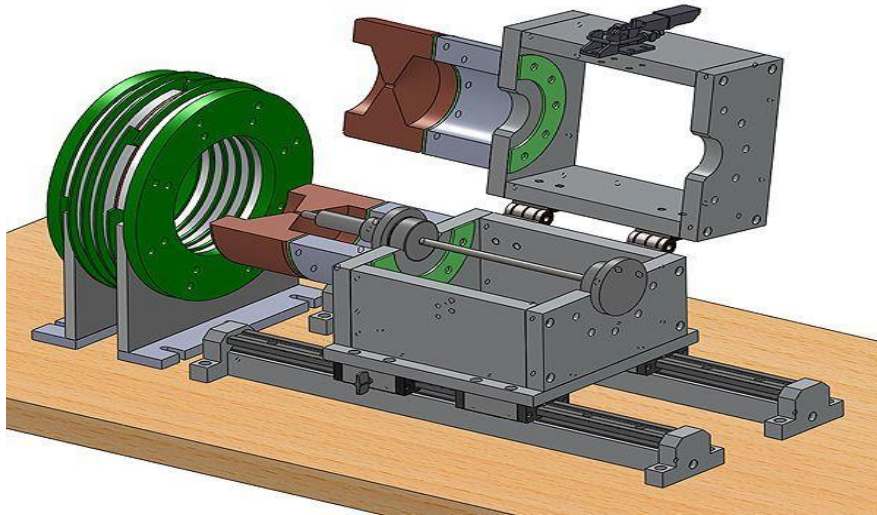


**Fig. I. 14 : Pièces formées par Soudage électromagnétique**

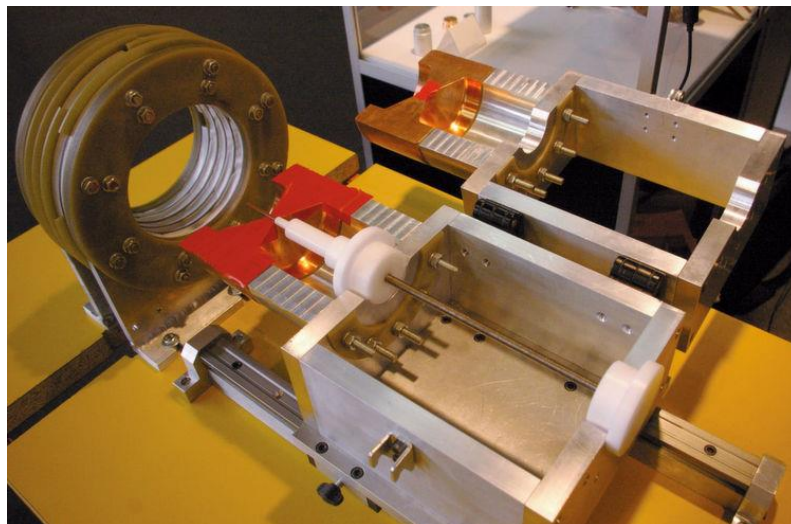
### I. 4. 2. Assemblage [3], [5], [w4]

L'assemblage est un procédé de formage électromagnétique (Fig. I. 15 et Fig. I. 16), il est destiné à assembler deux ou plusieurs matériaux qui sont sertis en compression ou en expansion.





**Fig. I. 15 : Vue virtuelle de l'installation : On distingue en vert la bobine et en brun la partie enserrant la pièce à assembler**



**Fig. I. 16 : stand Micronarc : Un modèle de démonstration**

### I. 4. 3. Formage

C'est un procédé de formage à haute vitesse qui modifie la géométrie d'une pièce par des forces de Lorentz qui sont exercées par des champs magnétiques pulsés. On distingue plusieurs opérations essentielles qui sont :

- Expansion (§ I. 3. 2) ;
- Compression (§ I. 3. 2) ;
- Emboutissage (Placage) (§ I. 3. 2) ;

- **Fléchissement (Bending) :**

C'est un procédé industriel, il ajoute de la rigidité à la pièce sans ajouter de poids. Il est utilisé surtout pour la production des châssis et des fermetures automobiles, il a donc un effet critique sur la qualité des assemblages finaux. On distingue plusieurs opérations de fléchissement (Fig. I. 17), parmi lesquelles : le flambage (Fig. I. 18), le pliage (Fig. I. 19), la couture (Fig. I. 20) et le perlage (Fig. I. 21) [3].

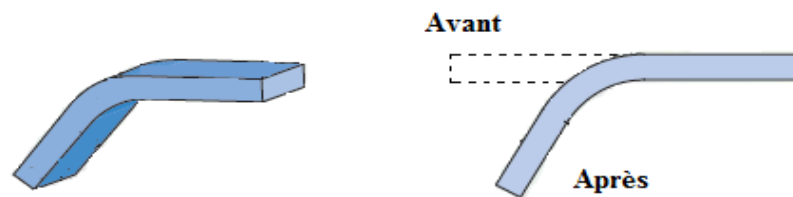


Figure I. 17 : Principe de fléchissement

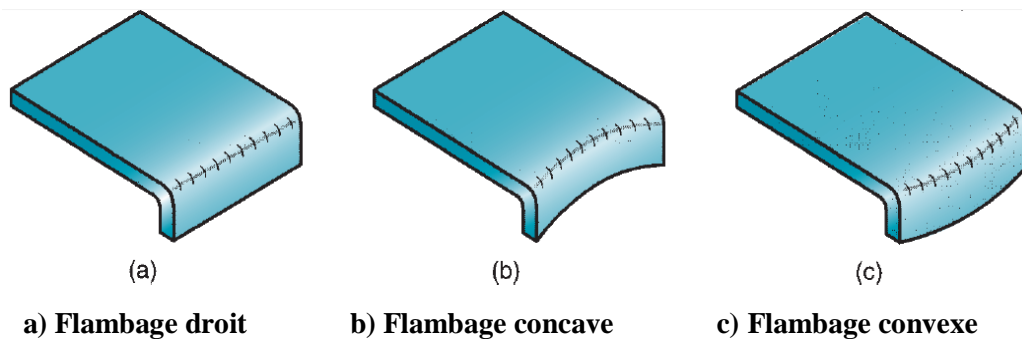


Figure I.18 : Trois types de flambage

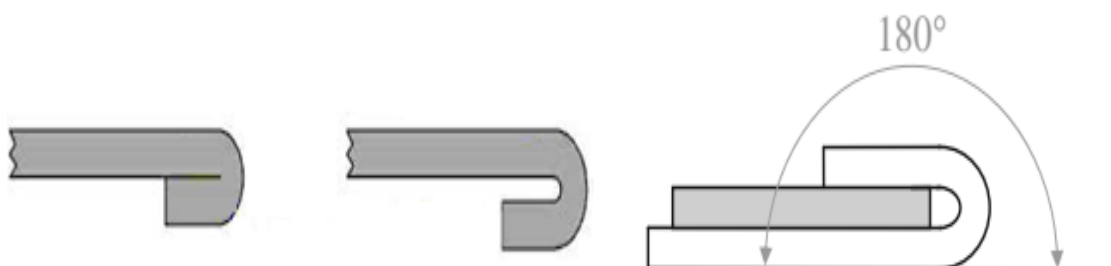


Figure I.19 : Pliage d'une plaque métallique  
Sur elle-même Sur une tôle

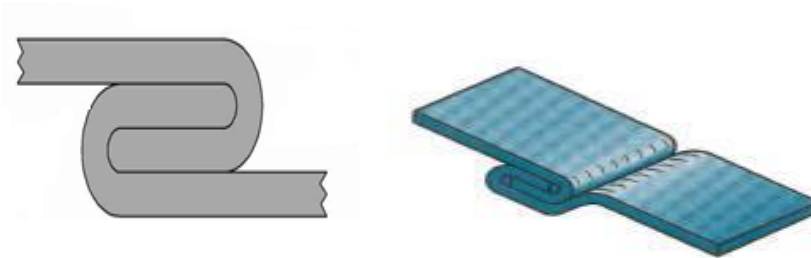


Figure I.20 : Couture ou double pliage de tôles métalliques

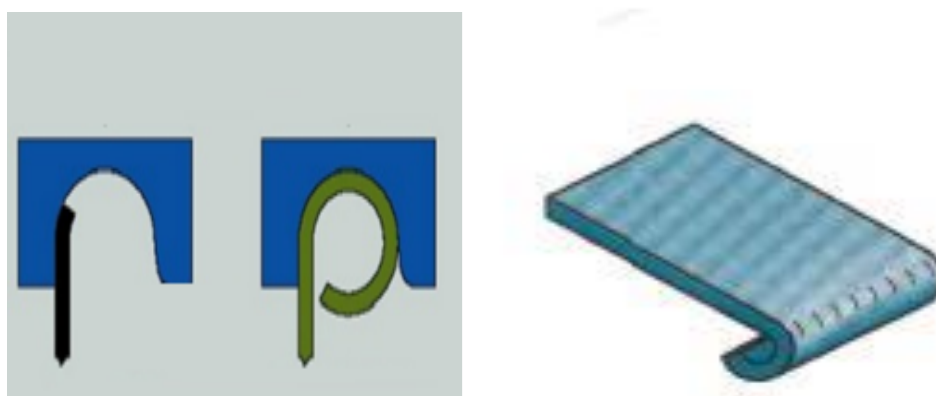


Figure I.21 : Perlage d'une plaque métallique

## I. 5. Applications industrielles

### I. 5. 1. Industrie Automobile

Le développement de l'utilisation de 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 de carburant et les émissions de polluants [w5].

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

Le principe est fondé sur la déformation plastique du matériau, déformation consistant en un allongement ou un rétreint local de la tôle pour obtenir la forme désirée (Fig. I. 22).



Fig. I .22 : Applications industrielles d'automobiles [3], [4]

### I. 5. 2. Aérospatiale

La navigation aérienne est un art qui exige beaucoup de la part des concepteurs. Désormais, grâce à la technologie du FEM, il est possible de simplifier toutes les étapes de l'ingénierie spatiale. Étant à même de former et de souder de l'aluminium, du magnésium, du titane de qualité et bien d'autres alliages, et d'offrir des assemblages métal-matériaux composites [2], [4].

- Connecteurs de câbles ;
- Tuyères ;
- Composants moteur ;
- Échangeurs thermiques ;

- Longerons d'aile ;
- Arbres de transmission ;
- Correction déformations superficielles sur revêtements d'avions.

### I. 5. 3. Les câbles

Qu'il s'agisse de câbles de transmission ou pour applications structurales, les câbles sertis par la technologie FEM offrent une meilleure résistance à la tension, de meilleures performances et plus d'endurance que les autres.

Le sertissage par FEM (Fig. I. 23) 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 [4].

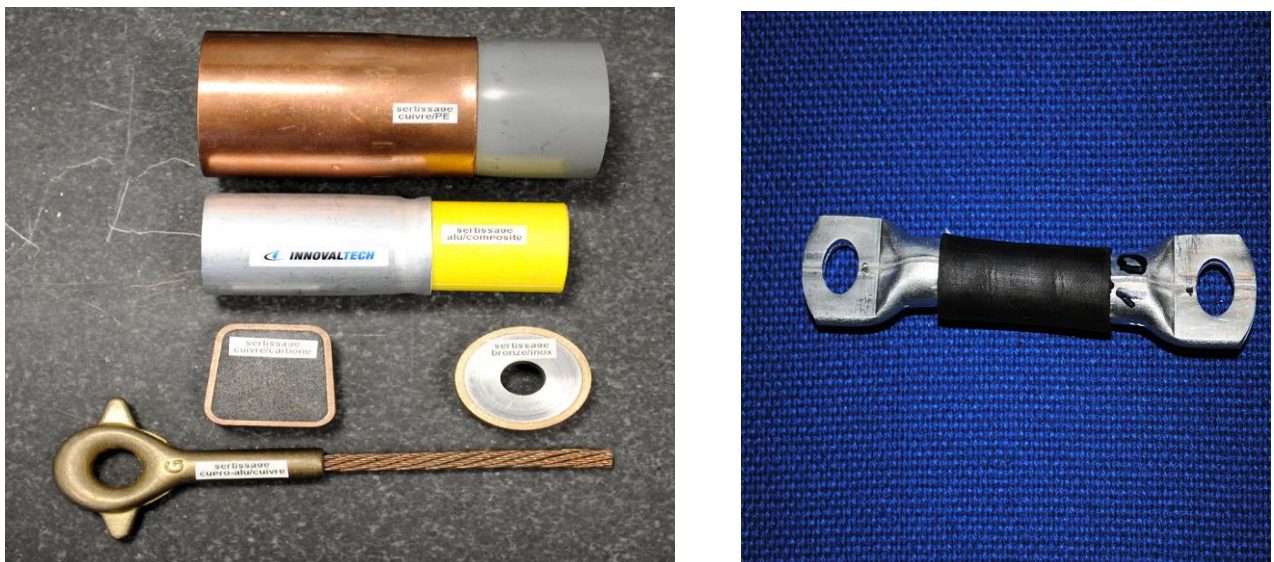


Fig. I .23 : Principe et résultat d'un sertissage par impulsion magnétique [w6]

### I. 6. Autres applications

Voici une liste non exhaustive des domaines dans lesquels la technologie FEM peut stimuler la créativité des concepteurs et des ingénieurs [3], [4].

- Couplage supraconducteurs-conducteurs normaux ;
- Appareils sous pression ;

- Tubes sous pression ;
- Cadres de bicyclettes ;
- Cadres de raquettes ;
- Télécommunications – raccords sertis pour câbles en fibre optique ;
- Boîtiers de téléphones cellulaires ;
- Cages et bagues de roulement ;
- Plateaux ;
- Soufflets – Tubulures médicales ;
- Masses-tiges – Gazoducs ;
- Gaz et fluides.



Figure I-24 : Soudage de différents matériaux

## **I. 7. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a pu mettre en évidence le processus du Formage Électromagnétique (FEM) où on a vu de manière générale les différentes techniques utilisées et les opérations industrielles de mise en forme des matériaux conducteurs par impulsion magnétique.

On a aussi vu que le magnétoformage est un procédé de bon rendement, et présente une production rapide avec de larges applications. Ainsi, l'esprit d'un concepteur industriel se penchera plus facilement sur ce procédé pour la réalisation des pièces de n'importe quel montage.

Le prochain chapitre est consacré à la formulation mathématique du processus du magnétoformage.

**CHAPITRE II**  
**Modélisation Mathématique**  
**du Magnétoformage**



## Chapitre. II : Modélisation Mathématique du Magnétoformage

### II. 1. Introduction

L'application d'un champ magnétique intense et pulsé développe dans des matériaux conducteurs de l'électricité des pressions suffisantes pour produire leur déformation et par conséquent leur mise en forme. Le métal placé dans le champ magnétique variable, est sollicité dans son épaisseur de peau et atteint des vitesses de déplacement de plusieurs centaines de mètres par seconde. Suivant la configuration des bobines de champ, des opérations de compression, d'expansion et de placage peuvent être réalisées, l'induction magnétique variable (ou onde magnétique) sert d'outil [9].

Dans ce chapitre, on va traduire la partie électromagnétique et mécanique du phénomène du magnétoformage illustré précédemment sous forme d'équations mathématiques.

### II. 2. Equations électromagnétique

Tous les phénomènes électromagnétiques sont régis par les quatre équations aux dérivées partielles de Maxwell. Sous leur forme la plus générale, ces équations s'écrivent [3], [10] :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (II.1)$$

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

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

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

Avec :

$\vec{E}$ : Champ électrique [V/m] ;

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

$\vec{H}$ : Champ magnétique [A/m] ;

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

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

$\vec{\rho}$ : Densité de charge [C/m<sup>2</sup>].

### II. 3. Loi de comportement

Les grandeurs et les liaisons des champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement des milieux ainsi que la loi d'Ohm.

#### a) Les relations des milieux :

- Relation magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (II.5)$$

- Relation diélectrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (II.6)$$

#### b) La loi d'Ohm :

- Au repos :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (II.7)$$

- En mouvement :

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (II.8)$$

Où :

$\vec{V}$ : Vitesse du point considéré ;

$\sigma, \mu$  et  $\varepsilon$  : sont les caractéristiques du milieu considéré et représentent respectivement : les tenseurs de conductivité électrique, de la perméabilité magnétique et de la permittivité électrique. En considérant que les milieux sont linéaires, homogènes et isotropes,  $\sigma, \mu$  et  $\varepsilon$  se ramènent à des scalaires ;

$\vec{B}_r$  : est l'induction magnétique rémanente.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (II.9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (II.10)$$

$\mu_0$ : Perméabilité du vide égale à  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] ;

$\mu_r$ : Perméabilité relative ;

$\varepsilon_0$  : Permittivité du vide, elle vaut  $10^{-9}/(36 * \pi)$  [F/m] ;

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative.

La densité de courant est donnée par :

$$\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (II.11)$$

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

Avec :

$\vec{J}_D$ : Densité du courant de déplacement ;

$\vec{J}_C$ : Densité du courant de conduction électrique induit ou inducteur donnée ;

$\vec{J}_S$  : Densité de courant source ;

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

Par la suite, l'approximation des états quasi-statiques est appliquée où on va négliger le courant de déplacement devant le courant de conduction.

Du fait que la divergence d'un rotationnel est nulle, l'équation (II.3) permet d'identifier le champ  $\vec{B}$  au rotationnel d'un autre champ de vecteur. On peut alors poser:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (II.13)$$

Pour assurer l'unicité de  $\vec{A}$ , il suffit de lui imposer la condition de jauge, telle que :

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (II.14)$$

Cela est justifié dans des configurations axisymétriques car l'équation de continuité qui assure l'unicité de  $\vec{B}$  donc celle de  $\vec{A}$  est constamment vérifiée.

On démontre, du fait que le rotationnel d'un gradient de toute fonction scalaire  $V$  est nul, que le champ  $\vec{E}$  dérive dans le temps du potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  et dans l'espace du potentiel scalaire électrique  $V$ , tel que :

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \text{grad}V \quad (II.15)$$

#### II. 4. Condition de passage

Jusqu'ici, toutes les liaisons source-champ et champ électrique-magnétique caractéristiques du milieu, ont été définies. Il reste à déterminer les relations entre les grandeurs de deux milieux électriquement et magnétiquement différents. Pour cela, on intègre les équations de Maxwell entre deux points très voisins de part et d'autre d'une surface séparant ces deux milieux, le résultat nous permet de constater :

- Condition de conservation de la composante normale de l'induction magnétique :

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

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

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (II.17)$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique due aux courants surfaciques  $\vec{J}_s$  :

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (II.18)$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique, en présence de charges surfaciques :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = Q_s \quad (II.19)$$

Avec

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

## II. 5. Équation de diffusion électromagnétique

En combinant les équations (II.1) et (II.13), on obtient la relation :

$$\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{rot}\vec{A}) = \mu\vec{J} \quad (II.20)$$

Comme notre induit (pièce à former) est munie d'une vitesse, l'équation de diffusion électromagnétique peut se mettre sous la forme générale suivante dans le cas d'attaque courant :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{rot}(\mu^{-1} \overrightarrow{rot}\vec{A}) - \sigma \vec{v} \cdot \overrightarrow{rot}\vec{A} = \vec{J}_{ex} \quad (II.21)$$

La densité de courant induit peut être calculée à partir de la relation suivante :

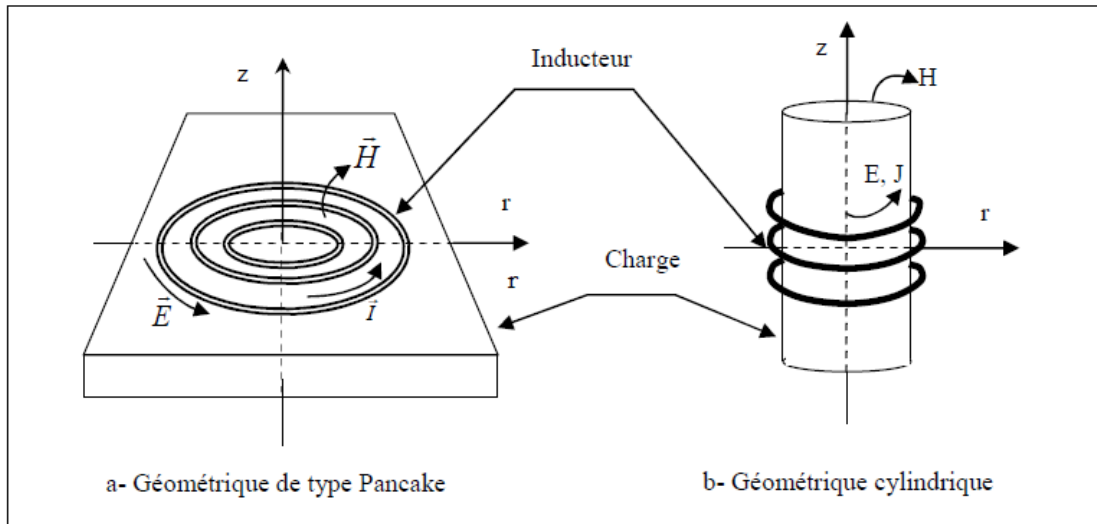
$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (II.22)$$

La force de Lorentz est donnée par :

$$\vec{F} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (II.23)$$

## II. 6. Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques

On Considère deux configurations, un inducteur plan spiral face à une charge plane (Fig. II. 1a) et un inducteur solénoïde entourant une charge cylindrique (Fig. II. 1b). Dans les deux cas, en négligeant l'élicité des spires inductrices, les systèmes possèdent une symétrie de révolution (système axisymétrique). Le problème est donc bidimensionnel car la densité de courant et le potentiel vecteur magnétique n'ont qu'une seule composante suivant la direction angulaire [10], [11]. Le potentiel se réduit à une seule composante suivant l'axe angulaire qui est appelé composante azimutale et ne dépend que de  $r$  et  $z$  où l'inconnue lui est perpendiculaire.



**Fig. II. 1 : Systèmes axisymétriques**

$$\begin{cases} \vec{A} = A_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & (II. 24. a) \\ \vec{J} = J_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & (II. 24. b) \end{cases}$$

En faisant un calcul vectoriel en coordonnées cylindriques de l'équation (II.13), on montre que l'induction magnétique n'a que deux composantes ; l'une est radiale et l'autre axiale [10]:

$$\vec{B} = B_r(r, z)\vec{e}_r + B_z(r, z)\vec{e}_z \quad (II. 25)$$

$$\begin{cases} B_r(r, z) = -\frac{\partial A(r, z)}{\partial z} & (II. 26. a) \\ B_z(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA(r, z))}{\partial r} & (II. 26. b) \end{cases}$$

Les deux composantes de la force de Lorentz en coordonnées cylindriques sont données par :

$$\begin{cases} F_r = J_\theta \cdot B_z & (II. 27. a) \\ F_z = -J_\theta \cdot B_r & (II. 27. b) \end{cases}$$

## II.7. Equations mécaniques [2], [3]

### II. 7. 1. Equation 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 :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (II. 28)$$

Avec :

$\rho$  : Densité [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] ;

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

$\sigma$  : Tenseur de contraintes [N/m] ;

$\vec{F}$  : Vecteur de charge [ $\text{N}/\text{m}^3$ ].

### II. 7. 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 :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (II. 29)$$

Avec :

$\varepsilon_{el}$ : Déformation élastique ;

$\varepsilon_p$  : Déformation plastique ;

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

$\alpha$  : Coefficient d'expansion thermique ;

$T$  : Température ;

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

Au cours de notre travail, on va négliger la déformation thermique, du fait que les variations de température durant le processus de FEM ne sont pas élevé.

Les composantes de la déformation sont :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

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

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

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

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

### II. 7. 3. Relation contrainte-déformation :

De manière générale, la contrainte dans un matériau est décrite par le tenseur symétrique :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (II. 30)$$

Avec :  $\tau_{ij} = \tau_{ji}$  ;  $i, j = x, y, z$

Pour le comportement mécanique des matériaux on trouve deux cas :

- Elastoplastique ;
- Isotrope.

Lors du développement du modèle numérique, on va se limiter au cas elastoplastique seulement.

### II. 8. Cas Elastoplastique

La relation contraintes-déformation est donnée par:

$$\sigma = D_{\varepsilon_{el}} + \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_p - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (II. 31)$$

Où :

$$D = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix} \quad (II. 32)$$

Avec :

$E$  : Le module de Young [Pa] ;

$v$  : Le coefficient de Poisson ;

$\varepsilon_0$ : La Contrainte initiale [Pa].

### II. 9. Symétrie axiale

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

Afin d'éliminer toute division 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 :

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

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

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

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

## II. 10. Conditions aux limites

Dans le problème mécanique, les conditions aux limites considérées portent sur la pièce à déformer:

- Axe de symétrie ( $r = 0$ ) ;
- Déplacement nul sur les frontières encastées de la pièce ;
- Libre sur les frontières de la pièce qui peuvent se déformer ;
- En cas de présence de matrice, on aura un plan d'appui.

## II. 11. Couplage Modèle Magnétique - Modèle Mécanique

Lors de la résolution du problème FEM, il existe deux choix : le Couplage faible et le couplage fort.

- **Couplage faible** : 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 éléments finis, donnant les déformations.

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.

- **Couplage fort** : Le couplage fort est celui qui donne les résultats les plus proches de la réalité et nécessite la résolution du système global (équations électromagnétiques, mécaniques) 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. 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.



- **Termes de couplage :** Pour l'équation mécanique, c'est les forces qui s'appliquent sur la pièce pendant le processus du magnétoformage (équation (II.27)) qui assurent le couplage.

Pour résoudre nos équations différentielles, il existe plusieurs méthodes à savoir : les méthodes analytiques, semi-numériques ou numériques.

Dans notre travail, on va utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5, qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications physiques en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques [w7].

L'implémentation de notre modèle numérique avec COMSOL fera l'objet du prochain chapitre.

## II. 12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement les équations de Maxwell et grâce à des considérations géométriques on a pu simplifier nos équations (cas bidimensionnel). Les équations mécaniques sont aussi introduits et simplifier.

On se limite dans notre étude au cas elastoplastique, un couplage fort est assuré lors de la résolution.

La réalisation du modèle numérique avec le logiciel COMSOL, ainsi que les résultats font l'objet du dernier chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **Applications et Résultats**

## Chapitre.III : Applications et Résultats

### III. 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation numérique du procédé du Magnétoformage en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5 qui est un logiciel de simulations numériques multiples qui prend comme méthode de calcul les éléments finis.

Aujourd'hui tous les logiciels qu'on utilise ont chacun un module de simulation propre, en mécanique, en électromagnétisme, en thermique, en acoustique, en rendement énergétique etc.... L'intérêt particulier observé ici c'est que COMSOL possède un seul et unique environnement qui permet à partir de fichiers natifs des plus grands nombres de modélisateurs le couplage de toutes les simulations possibles ensemble [w8]. En effet, l'utilisateur du logiciel COMSOL définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface [w7].

Dans notre travail, on va réaliser des modèles afin d'analyser et d'étudier l'emboutissage de plaques avec et sans matrice. On se basera sur un modèle expérimental [1], [11].

### III. 2. Applications d'emboutissage libre de plaques métalliques

Le dispositif du magnétoformage destiné à l'emboutissage libre (Fig. III.1) est celui employé par Takatsu et al [1], [2], [11]. C'est un dispositif expérimental composé d'une bobine plate (bobine de Pancake) au dessous du disque mince en Aluminium fixé en son extrémité. La bobine de formage est approximée par des spires circulaires coaxiales ou circule le courant de décharge d'un banc de capacités.

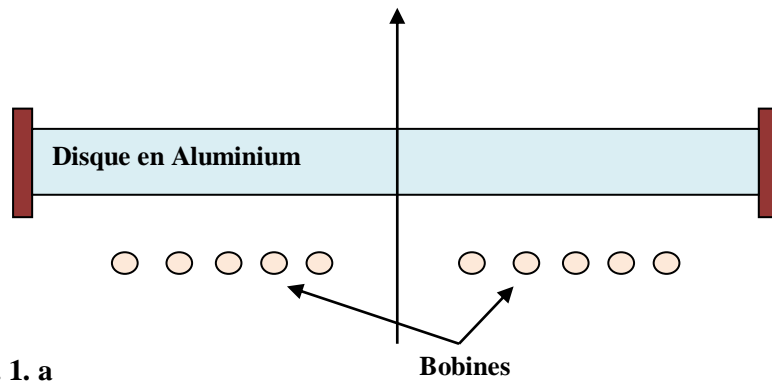


Fig. III. 1. a

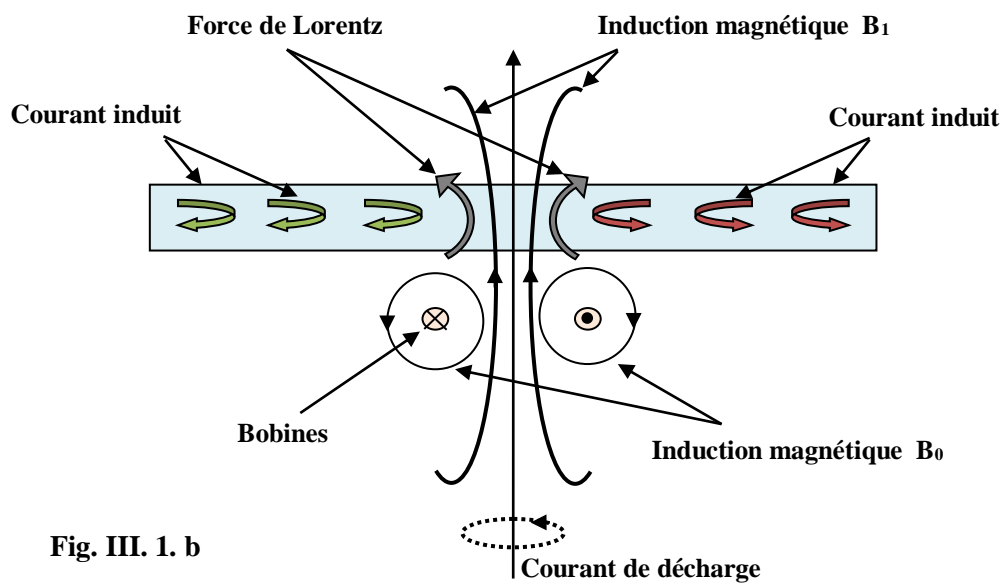
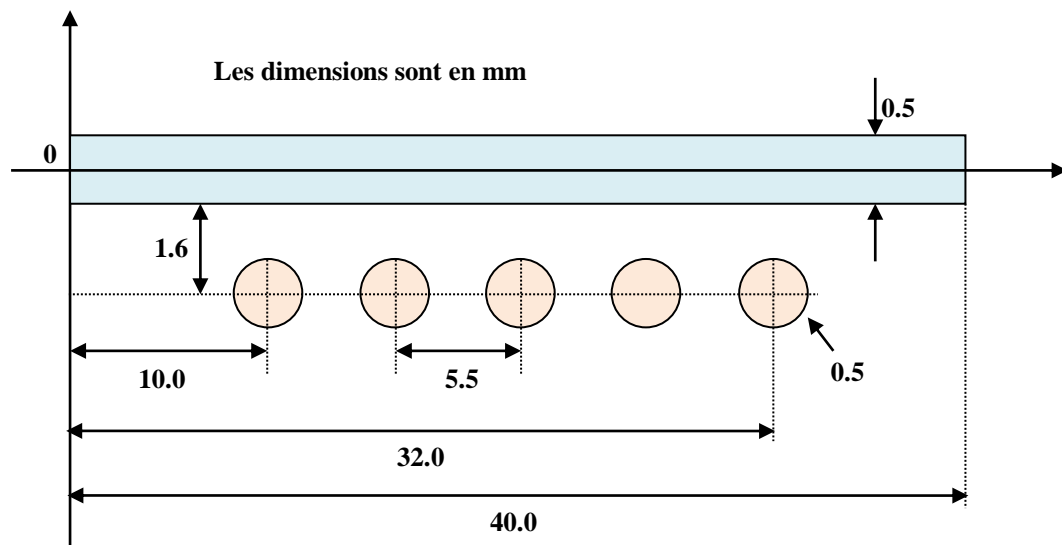


Fig. III. 1. b

**Fig. III. 1 : a. Dispositif destiné à l'emboutissage libre  
b. Processus du magnétoformage et développement  
de la force de Lorentz**

Dans le modèle numérique, seulement la moitié du système est simulée à cause de la symétrie axiale de la géométrie (Fig. III. 2).



**Fig. III. 2 : Géométrie de l'essai proposé par [1]**

Le tableau III.1. résume les différents paramètres du système d'emboutissage

Nombre de spires	5
La section de spire	$0.5 \cdot 10^{-3}$ [m]
Conductivité électrique de la bobine (cuivre)	$5.8 \cdot 10^7$ [s/m]
Rayon de la plaque	0.04 [m]
Epaisseur de la plaque	$0.5 \cdot 10^{-3}$ [m]
Conductivité électrique de la plaque (Aluminium)	$3.6 \cdot 10^7$ [s/m]
Conductivité thermique	160 [W/(m*k)]
Densité	2700 [kg/m <sup>3</sup> ]
Capacité calorifique à pression constante	900 [J/(kg*k)]

**Tableau III. 1 : Paramètres du système d'emboutissage**

### III. 2. 1. Evolution temporelle du courant inducteur

Un fort courant électrique pulsatoire est imposé à travers une bobine spirale résultant de la décharge d'un banc de capacités (Fig. III. 3). En appliquant la loi de Kirchhoff, on obtient l'équation différentielle suivante [1], [2], [10], [11] :

$$\frac{d^2 I(t)}{dt^2} + 2\xi\omega \frac{dI(t)}{dt} + \omega^2 I(t) = 0 \quad (III. 1)$$

Avec :

$I(t)$  : Courant de décharge du banc de capacités ;

$\xi$  : Coefficient d'amortissement donnée par  $\xi = \frac{1}{2}R\sqrt{\frac{L}{C}}$

$\omega$  : est la fréquence naturelle donnée par  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  ;

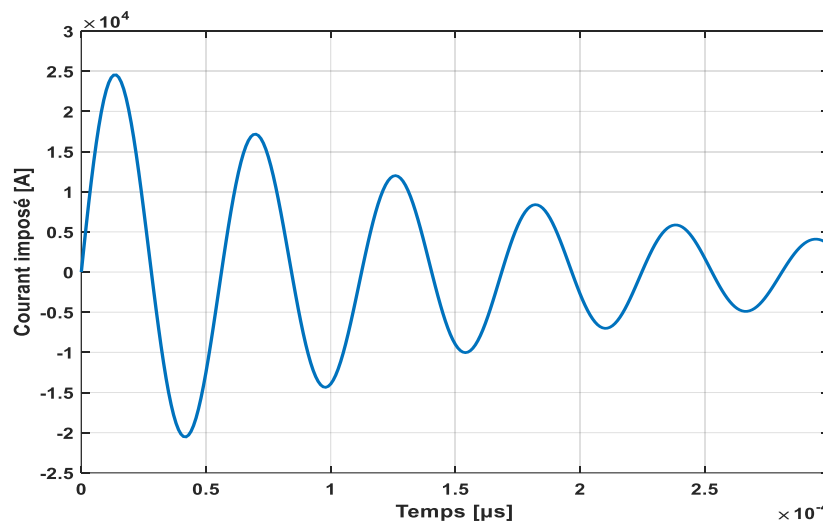
$R, L$  et  $C$  sont les paramètres du système.

En résolvant l'équation différentielle (III.1), le courant de décharge est une fonction de temps dont la forme est donnée par la relation suivante :

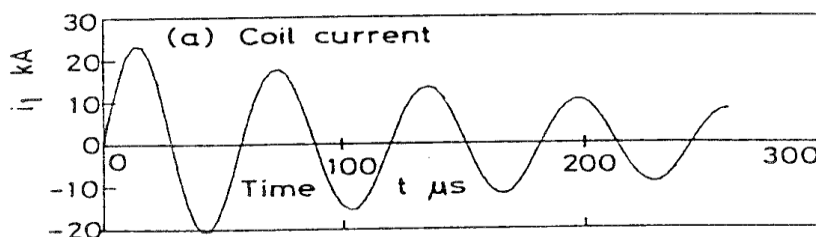
$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi\omega t) \sin(\omega t) \quad (III.2)$$

Où  $V_0$  est la tension de charge des capacités.

Takatsu et al [1], [11], ont réalisé l'essai avec une bobine de 5 spires connectées à un banc de capacités de  $40\mu F$ , avec une inductance totale de  $2\mu H$  et une résistance totale du circuit de  $25.5 m\Omega$ . La tension de charge des capacités vaut  $V = 6kV$ . La fréquence et le courant de décharge sont calculés selon ces caractéristiques (Fig.III.4). On néglige la variation de l'inductance mutuelle durant le processus du magnétoformage [2], [11].

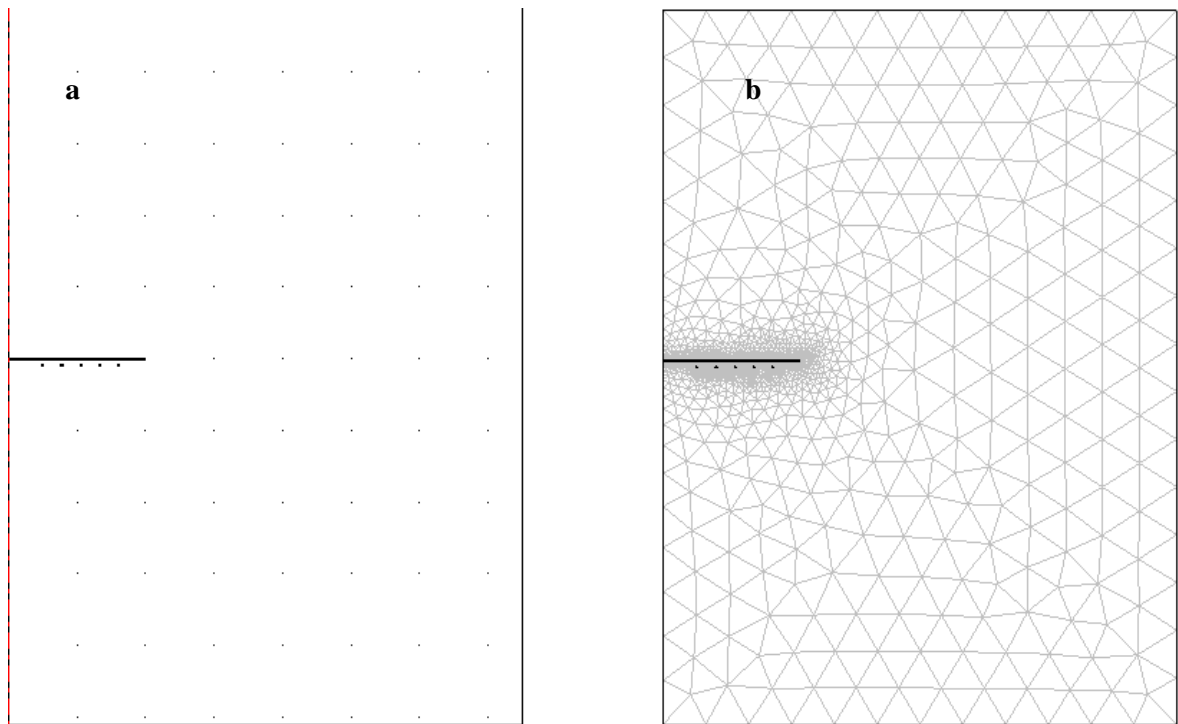


**Fig. III. 3 : Evolution temporelle du courant de décharge**

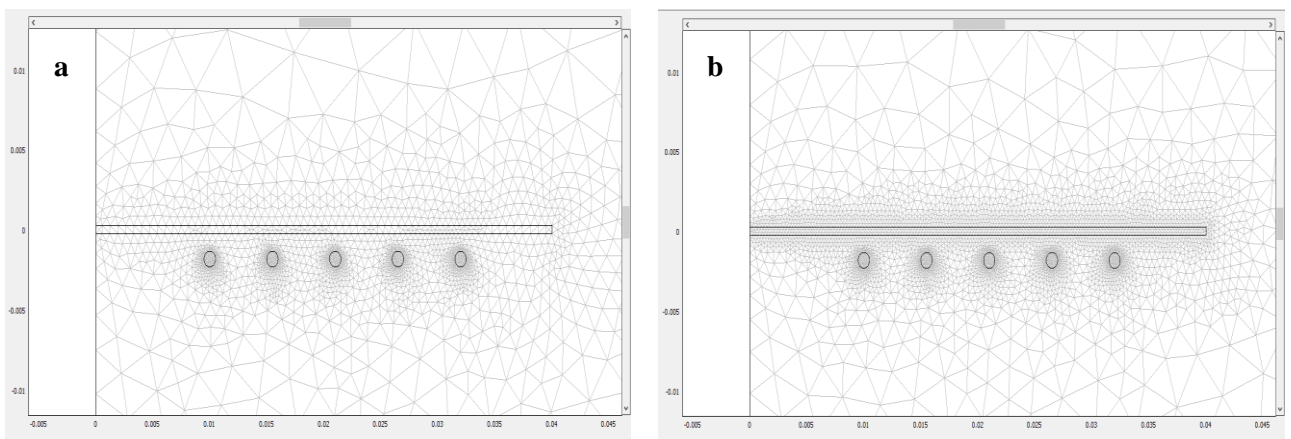


**Fig. III. 4 : Evolution temporelle du courant de décharge imposée dans [11]**

La modélisation numérique est élaborée en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5. Les figures (III. 5 . a) et (III. 5. b) représentent respectivement la géométrie du système à modéliser ainsi que la maillage initial crée, tandis que les figures (III. 6. a) et (III.6 .b) montrent un zoom du maillage initial et final en utilisant un maillage libre sur sous domaines avec une taille d'éléments maximale de 0.00025. m<sup>2</sup>



**Fig. III. 5 : a. Géométrie du système d'emboutissage  
b. Maillage initial du domaine**



**Fig. III. 6 : a. Zoom sur le maillage initial  
b. Zoom sur le maillage final**

### III. 3. Calculs préliminaires : Emboutissage libre

Afin de vérifier la validité du modèle électromagnétique, une analyse préliminaire est effectuée sans la pièce à former.

La géométrie analysée est discrétisée en 8867 éléments triangulaires du second ordre, le nombre de degrés de liberté résolus est de 22312 avec un temps de calcul estimé par 35,493 s.

Pour la discrétisation temporelle, le pas de temps est pris égal à  $1\mu\text{s}$  et la période de simulation est de  $300\mu\text{s}$ . Le déplacement et la déformation de la pièce sont pris en compte par remaillage à chaque pas de temps.

La variation des deux composantes de l'induction magnétique  $B_z$  et  $B_r$  est représentée sur la (Fig. III. 7) en absence de la pièce métallique à former. Le calcul est effectué à l'instant  $t = 14\mu\text{s}$  où le courant de décharge atteint sa valeur maximum. Tandis que sur la (Fig. III.8), on représente la distribution des composantes  $B_z$  et  $B_r$  de l'induction magnétique en présence de la pièce métallique en Aluminium aussi à l'instant  $t = 14\mu\text{s}$ .

À partir de la (Fig. III.8), on peut voir clairement que la composante radiale  $B_r$  de l'induction magnétique est plus importante que la composante axiale  $B_z$ . Selon la relation donnant l'expression de la force de Lorentz (équation (II.27)), la contribution de la composante axiale de la densité de force de Lorentz (Fig. III. 9) est prépondérante et contribue essentiellement à la déformation de la pièce en Aluminium [1], [11].

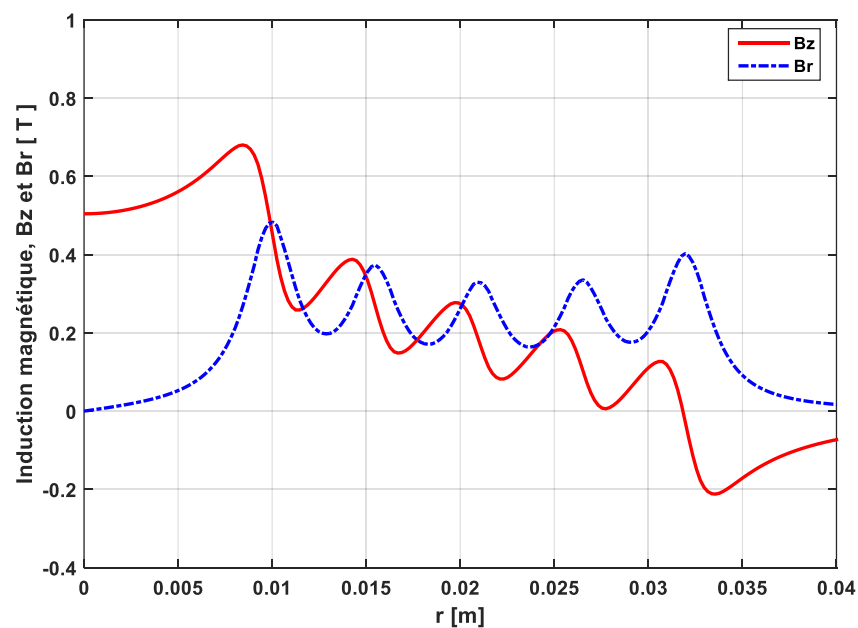


Fig. III. 7 : Variation des composantes de l'induction magnétique  $B_z$  et  $B_r$  sans pièce à former



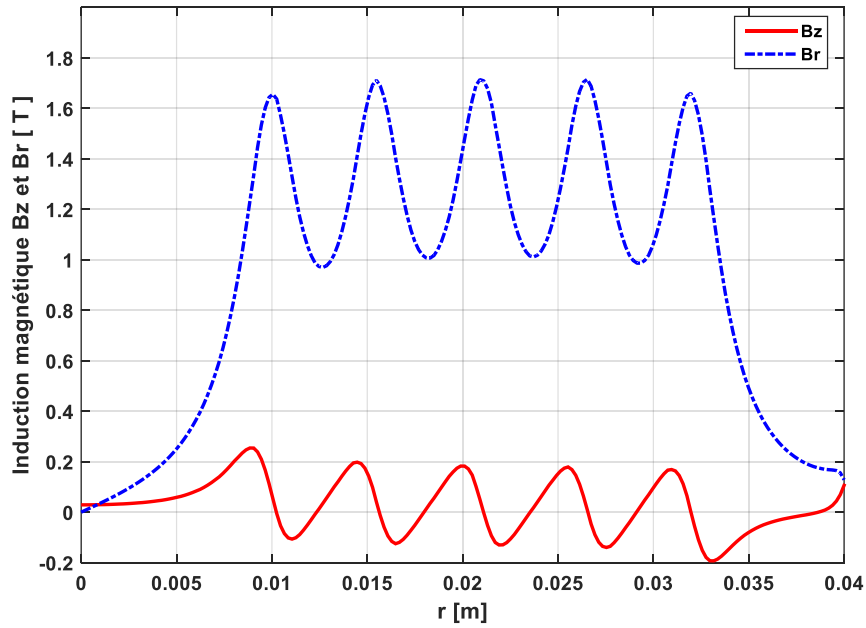


Fig. III. 8 : Variation des composantes de l'induction magnétique  $B_z$  et  $B_r$  avec pièce à former

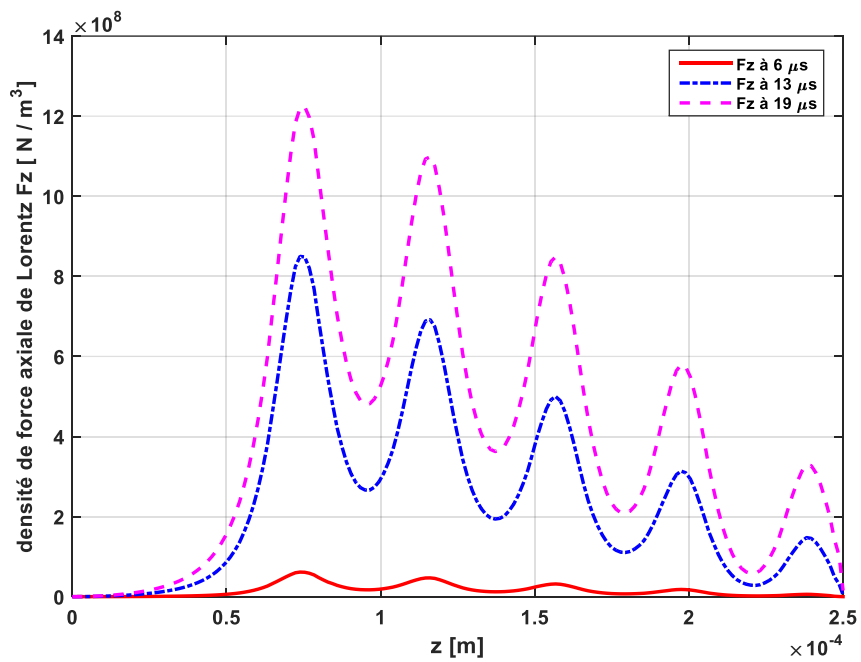
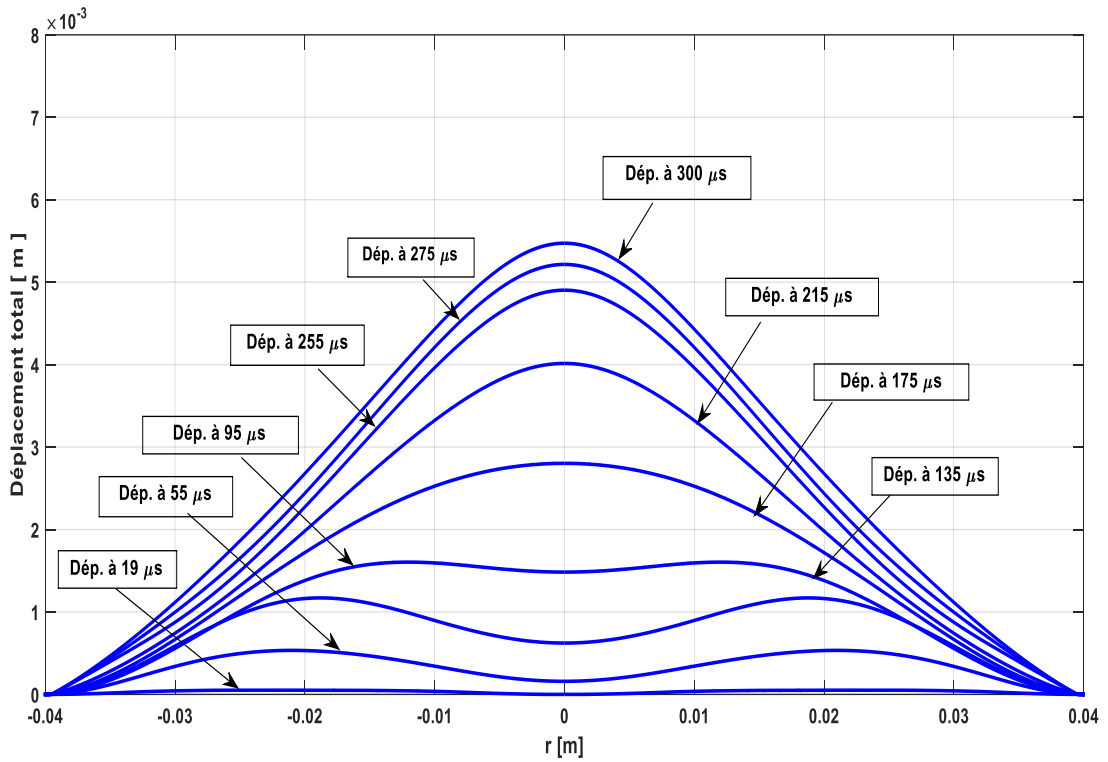


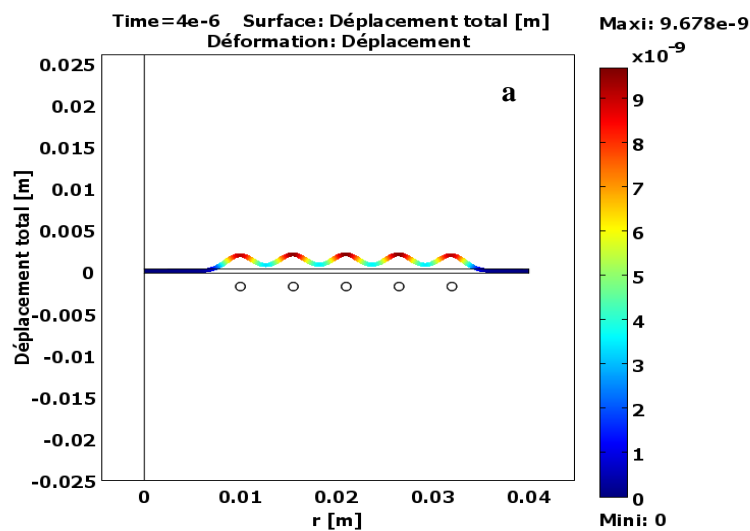
Fig. III. 9 : Variation de la densité de force à l'intérieur de la pièce

On note un très bonne concordance physique entre nos résultats et ceux cités dans la littérature scientifique [1], [2], [11].



**Fig. III. 10 : Déformation de la plaque lors du processus du FEM**

La figure ci-dessus (Fig. III. 10) représente le processus d'emboutissage, on remarque que la déformation est non uniforme ce qui est due à la géométrie de la bobine plate spirale [1], [2], [11]. En effet, la déformation du centre du disque est en retard par rapport à celui des autres points du disque aux premiers instants (Fig. III. 11) à cause de la distribution non uniforme des forces magnétiques qui dépend du flux magnétique et par conséquent de la forme de l'inducteur [2]. Cette constatation est vérifiée numériquement et expérimentalement (Fig. III. 12) [1], [2], [11].



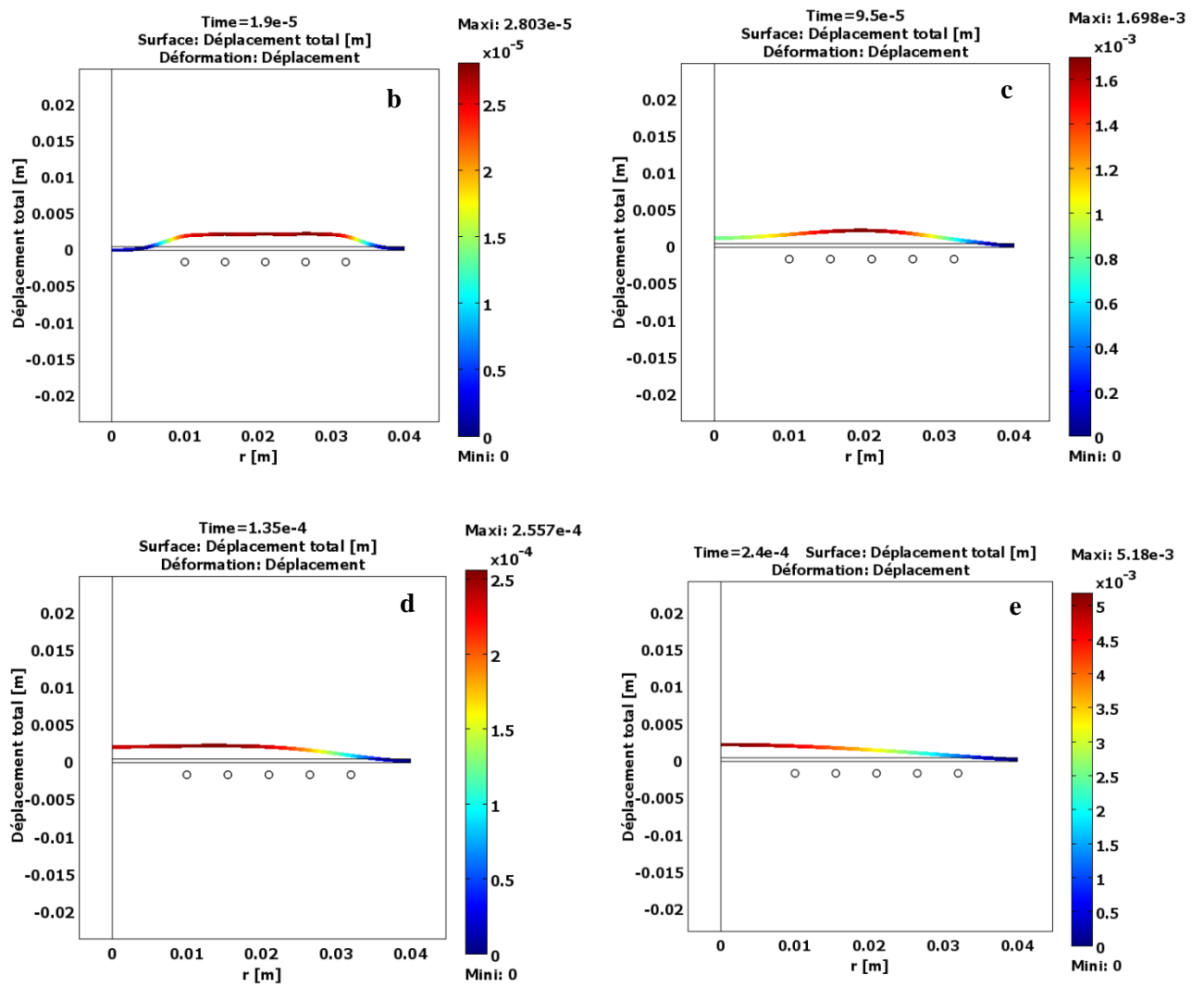


Fig. III. 11 : Géométrie déformée de la pièce à différent pas de temps: (a) à  $t = 4 \mu\text{s}$ , (b) à  $t = 19 \mu\text{s}$ , (c) à  $t = 95 \mu\text{s}$  (d) à  $t = 135 \mu\text{s}$  et (e) à  $t = 240 \mu\text{s}$ .

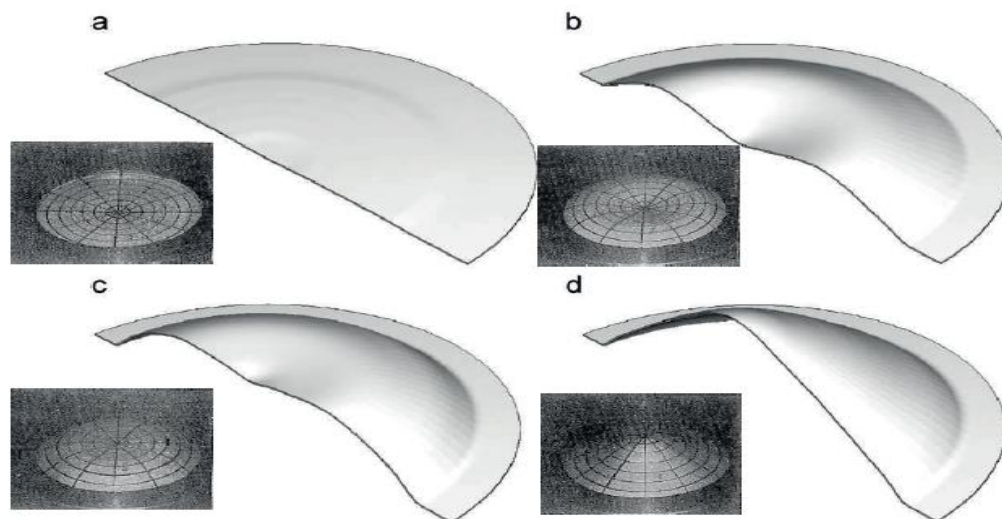


Fig. III. 12 : Les prévisions et résultats expérimentaux de la géométrie déformée de la pièce à différent pas de temps: (a) à  $t = 19 \mu\text{s}$ , (b) à  $t = 95 \mu\text{s}$ , (c) à  $t = 135 \mu\text{s}$  (d) et à  $t = 240 \mu\text{s}$ .

### III. 4. Formage de plaque avec matrice

À partir de la pression magnétique, on ne peut guère assurer la forme exacte à donner à la pièce, tout au plus, pourra-t-elle être accentuée là où 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 (dissymétrie, pièce "froissée") [13]. Par conséquent, la forme à obtenir sera déterminée par un moule ou "matrice" contre lequel la pièce vient se plaquer. Lorsque celle-ci entre au contact de la matrice, elle y perd vitesse et énergie cinétique.

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 (capacité à absorber des chocs mécaniques d'énergie élevée), 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.

Pour les grandes vitesses on pourra choisir, par exemple, des plastiques tels que le polyuréthane de forte densité, ou bien une matrice en caoutchouc gonflable permettant ainsi le formage et le démoulage de pièces complexes, ou encore du bois ... [9], [13].

#### III. 4. 1. Matrice hémisphérique

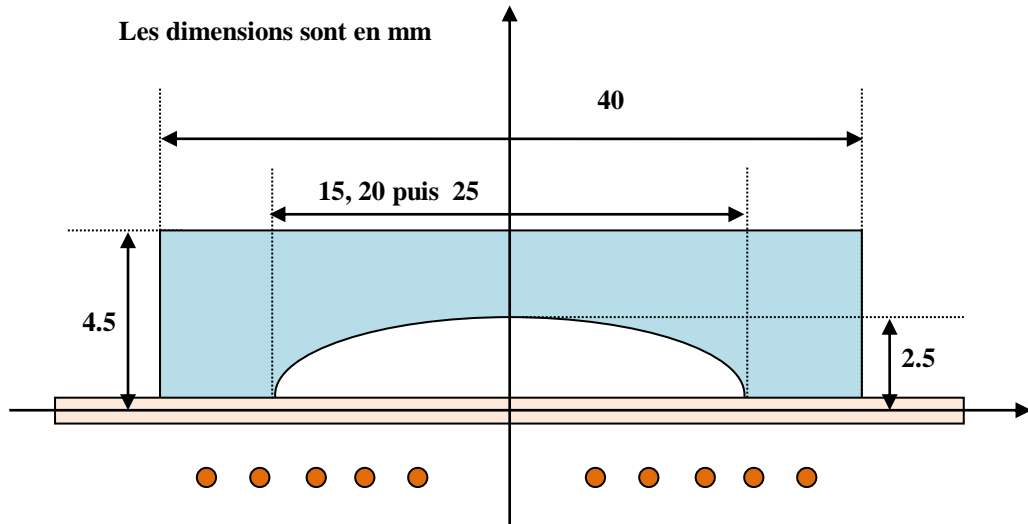
Dans cette partie, on va appliquer notre modèle numérique à une installation de formage magnétique de plaques, destinée à la production de certaines parties de la carrosserie des voitures dans l'industrie d'automobiles [2].

On va garder la même application (§ III. 2) et on va rajouter une matrice hémisphérique (Fig. III. 13). La forme de la matrice (exactement le point d'appui de la matrice) changera où on va considérer trois cas avec un rayon interne de 15mm, 20mm et 25mm.

Pour les composants  $R$ ,  $L$  et  $C$  on aura toujours les mêmes valeurs que précédemment  $R = 25.5 m\Omega$ ,  $L = 2\mu H$ ,  $C = 40\mu F$  sauf que la tension sera de  $V = 1.5kV$ , de  $V = 6kV$  puis  $V = 12kV$  successivement. Pour la matrice on utilise l'acier dont les paramètres sont regroupés dans le Tableau III. 2.

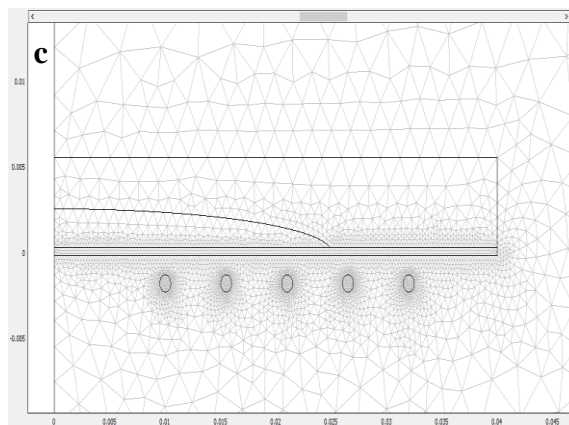
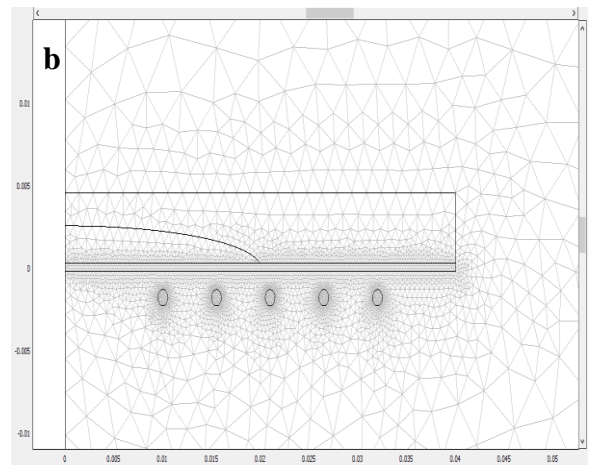
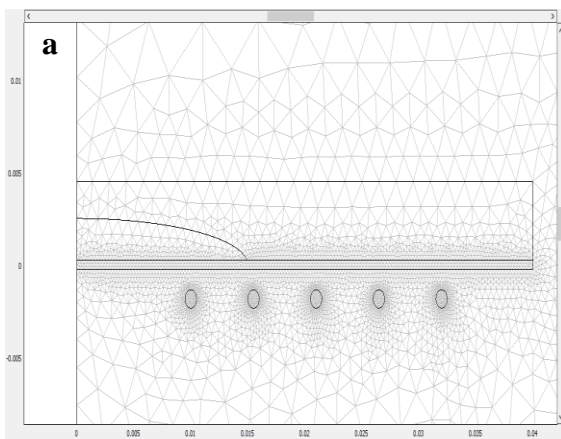
Module de Young	$205 \cdot 10^9$ [Pa]
Coefficient de Poisson	0.28
Densité	7850 [kg/m <sup>3</sup> ]

**Tableau III. 2** : Paramètres de la matrice



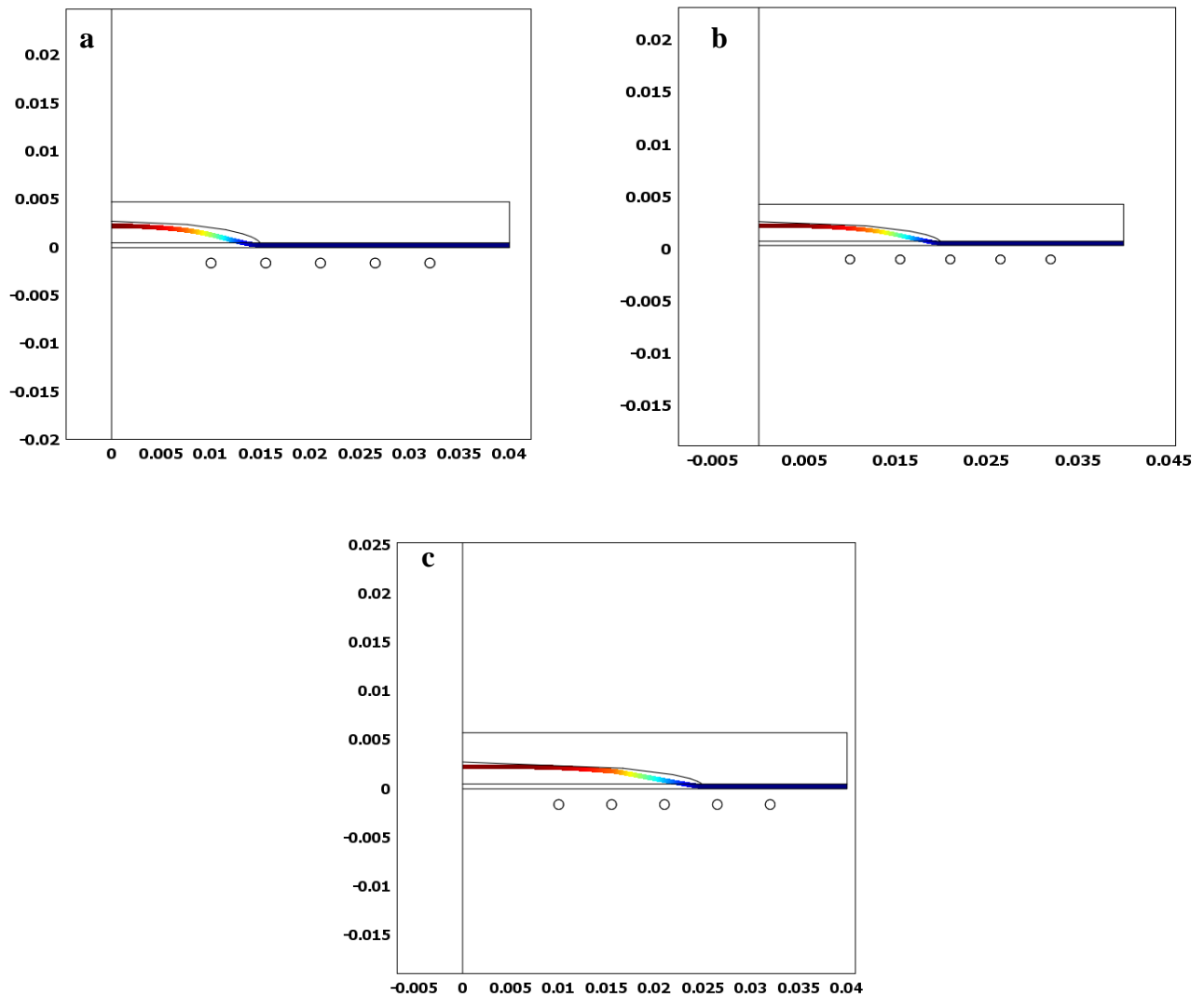
**Fig. III. 13 : Géométrie de l'essai avec matrice hémisphérique**

Les figures suivantes (Fig. III.14 : a, b et c) représentent le maillage généré pour chaque applications.



**Fig. III. 14 : Maillage du domaine d'étude  
a : rayon de 15 mm, b : rayon de 20 mm et c : rayon de 25mm**

La déformation de la plaque, initialement au repos, commence après quelques microsecondes jusqu'à atteindre le profil final (Fig. III.15 : a, b et c).



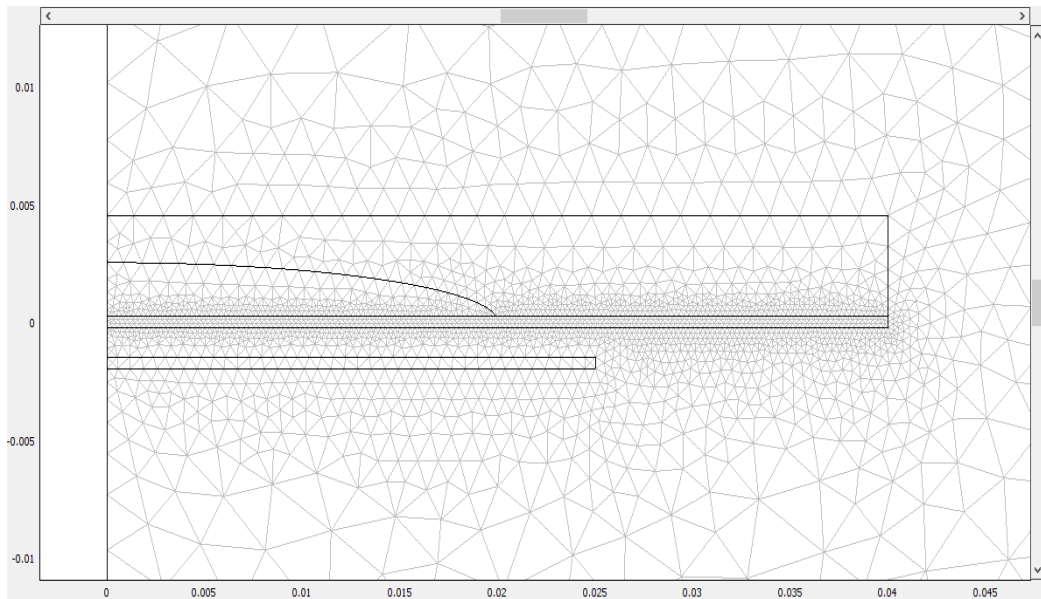
**Fig. III. 15 : Déformation de la pièce avec une matrice hémisphérique  
a : rayon de 15 mm, b : rayon de 20 mm et c : rayon de 25mm**

On constate clairement qu'il n'y a pas de déformation de la plaque dans la région  $r = 15mm$  à  $r = 40mm$  pour la première application, de  $r = 20mm$  à  $r = 40mm$  pour la deuxième application, et finalement de  $r = 25mm$  à  $r = 40mm$  pour la troisième application, car la matrice ne le permet pas.

Aussi, on a changé la valeur de la tension appliquée pour chaque cas, car la déformation et donc les forces appliquées lors du processus du magnétoformage, seront plus importants lorsque le rayon interne de la matrice est important.

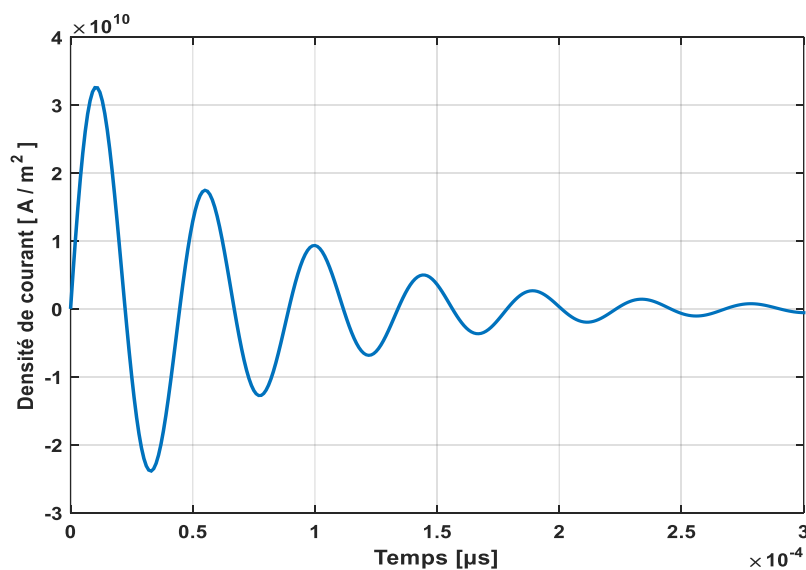
Il est important de noter que les résultats obtenus dépendent essentiellement de la forme de l'inducteur et du courant injecté. Pour vérifier cela, on va changer la forme de l'inducteur (Fig. III 16) et on va comparer les résultats.

En effet, l'inducteur est une barre rectiligne de  $(25\text{mm} \times 0.25\text{mm})$  en cuivre. l'intervalle entre la plaque et l'inducteur est de  $2\text{mm}$ , cet intervalle joue un rôle important lors du processus du magnétoformage. Pour les composants du circuit de décharge  $R, L$  et  $C$ , on va prendre  $R = 5.66\text{ m}\Omega$ ,  $L = 20.2\mu\text{H}$ ,  $C = 25\text{mF}$  [2].



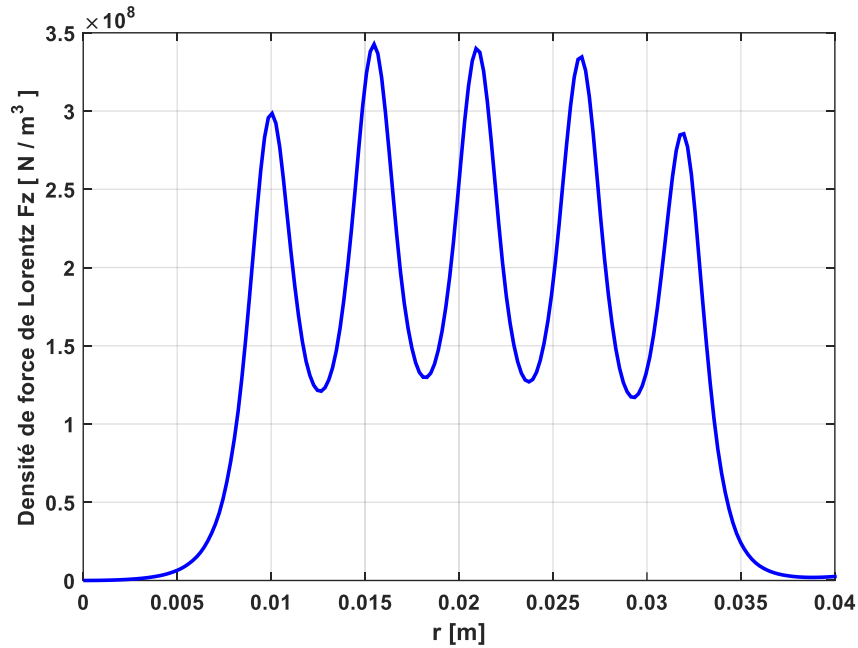
**Fig. III. 15 : Maillage initial du domaine d'étude**

La (Fig. III. 16) représente la densité de courant imposée.

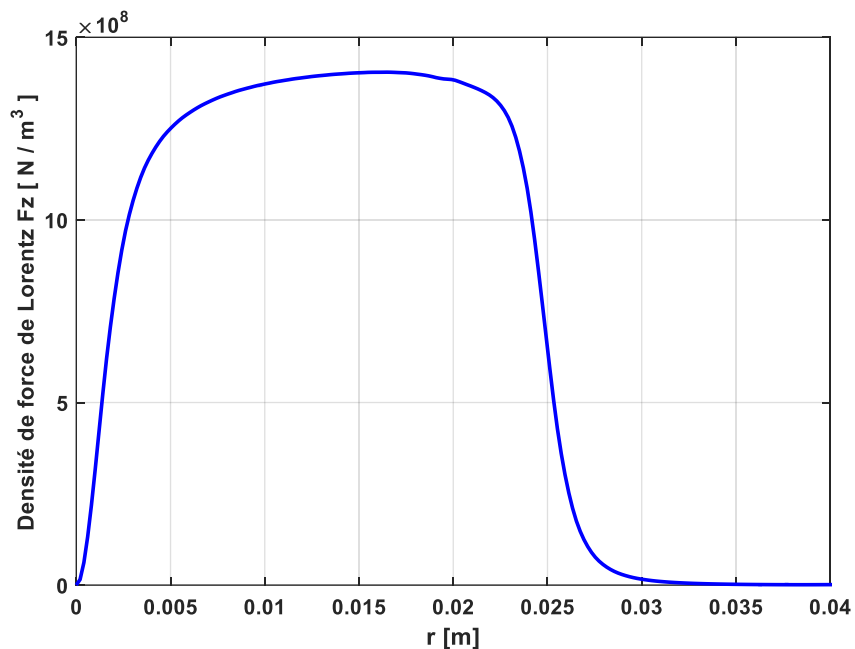


**Fig. III. 16 : Evolution temporel de la densité de courant de décharge imposé**

On se propose de tracer la composante axiale de la densité de force de Lorentz (Fig. III. 17) et (Fig. III. 18) pour les applications : inducteur du type pancake et le deuxième type rectiligne.



**Fig. III. 17: Evolution temporel de la composante axiale de la force de Lorentz pour un inducteur de type pancake.**



**Fig. III. 18: Evolution temporel de la composante axiale de la force de Lorentz pour un inducteur de type rectiligne.**

Le temps d'emboutissage pour la première application est de l'ordre de  $350 \mu\text{s}$  tandis que pour l'application avec inducteur rectiligne, il est plus court et vaut  $150 \mu\text{s}$ . On constate aussi que la composante axiale de la force de Lorentz est plus importante dans le deuxième cas.



Ces remarques sont concordent avec ceux citées dans la littérature scientifique. La déformation va dépendre essentiellement de la géométrie de la matrice, de la forme de l'inducteur et du courant qu'on y injecte [1], [2], [4], [5], [11].

En effet, le choix du type de l'inducteur doit répondre à un cahier des charges bien déterminé et qui répond à des besoins bien définis (besoins industriels).

C'est pour cette raison, qu'on propose comme perspective de ce travail d'étudier l'impact du type d'inducteur avec attaque tension sans et avec matrice.

### **III. 5. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a réalisé un outil numérique qui permet un couplage fort entre les phénomènes magnétiques et mécaniques par le biais des forces de Lorentz.

Ce modèle permet, de manière précise, de déterminer les grandeurs électromagnétiques où on a pu calculer par exemple la densité du flux magnétique ainsi que les forces électromagnétiques. Pour les grandeurs mécaniques, en particulier le déplacement et la déformation, on a pu les tracer facilement et comparer nos résultats avec ceux publiés où on note une très bonne concordance.

On a même pu implémenter d'autres modèles numériques en introduisant la matrice et ceci en changeant la forme de l'inducteur ainsi que les caractéristiques électrique du circuit de décharge. On en conclut que le procédé magnétoformage dépend essentiellement des premières crêtes du courant de décharge et donc des forces nécessaires pour la mise en forme de la pièce. Par conséquence, un choix adéquat des valeurs des composants du circuit inducteur et du type d'inducteur joue un rôle primordial.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Dans ce travail, on a réalisé un modèle numérique pour étudier et analyser le processus du Formage Électromagnétique FEM. L'analyse numérique nous a permis d'étudier un large éventail d'informations en peu de temps.

En effet, on a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5, où on a pu analyser certains phénomènes physiques du processus d'emboutissage, libre et avec matrice, utilisé dans la fabrication de la carrosserie des voitures.

On en conclut que :

- La déformation de la pièce au cours de ces processus est fortement liée à la géométrie de l'inducteur, du courant de décharge et la présence ou l'absence de matrice, ainsi qu'à sa géométrie. Ces constatations sont vérifiées et concordent très bien avec ceux cités dans la littérature scientifique ;
- L'utilisation de la matrice est nécessaire pour déterminer la forme exacte qu'on veut donner à la pièce, et cela pour éliminer les difformités néfastes (dissymétrie, pièce "froissée"), et doit être réalisée en un matériau résistant aux chocs ;
- D'autre part, la forme de l'inducteur et les valeurs des composants du circuit de décharge, ainsi que la distance entre l'inducteur et la pièce, ont un effet fondamental sur le temps et la force nécessaire (force de Lorentz) pour déformer la pièce.

En perspectives, on peut obtenir des modèles pour simuler des processus industriels de FEM, en étendant les modèles bidimensionnels aux modèles tridimensionnels avec attaque tension.

# **Bibliographie**

- [1] : 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.
- [2] : Hafsaoui Ilhem née Boutana, « Etude et modélisation numérique tridimensionnelle des effets mécaniques de champ électromagnétique ». Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2009.
- [3] : Abderrahmen BOUSBA, Yaaqoub NEDJARI BENHADJ ALI, « Etude et Modélisation d'Applications Industrielles du Formage Electromagnétique ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel. 2017.
- [4] : Rili Hicham, Kernou Samir, « Mise en forme d'un tube métallique par magnétoformage ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université Abderrahmane MIRA - Bejaia. 2014.
- [5] : Boussalem Mohammed El Amine, « Modélisation du comportement mécanique d'un système de formage électromagnétique ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel. 2014.
- [6] : BelfareS Arezki Djamil, Touati Yacine, « Modélisation électromagnétique et mécanique de l'expansion d'un tube par magnétoformage ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université Abderrahmane MIRA - Bejaia. 2017.
- [7] : Teodora-Emilia Motoasca, « Electrodynamics in Deformable Solids for Electromagnetic Forming ». Thèse de Doctorat, Université de Transylvania, 2003.
- [8] : Vincent Robin, « De la modélisation numérique des procédés et du soudage en particulier au comportement mécanique des assemblages ». Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Spécialité : Mécanique et Ingénierie. 2009.
- [9] : Hervé Gallizzi, « Étude et application des champs Magnétiques intenses au Soudage d'éléments tubulaires en aciers inoxydables ». Centre d'Étude Nucléaires de Cadarache. Rapport CEA-R-5355. Mai 1986.
- [10] : Dahmana Karima, « Calcul des forces dans les systèmes de formage et de lanceur électromagnétiques ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université Abderrahmane MIRA - Bejaia. 2015.
- [11] : Maouche Bachir, « Etude et développement semi-analytique de l'équation de diffusion Electromagnétique avec terme de déplacement dans le cas de dispositifs

- axisymétriques excités en courant ou en tension», Thèse de magister, Centre Université de Bejaia, 1996.
- [12] : Takatsu N., Kato M., Sato K., Tobe T., «High speed forming of metal sheets by electromagnetic forces», International Journal of Japanese Society for Mechanical Engineering 1980; 60; pp. 142-148.
- [13]: Vincent Tortel, «Conception d'un générateur d'impulsion de 1 kJ pour le magnétoformage». Thèse de Doctorat, l'université des sciences et techniques de Lille Flandres Artois, Spécialité : Electronique. 1993.
- [w1] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9toformage>
- [w2] : <http://www.metatron.fr/magneton.html>
- [w2] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice\\_\(technologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice_(technologie))
- [w4] : <https://www.msm.ch/index.cfm?pid=9776&pk=318920&fk=383368&type=article#1>
- [w5] : <https://cordis.europa.eu/project/rcn/63636/brief/fr>
- [w6] : [http://www.pft-innovaltech.fr/cpt\\_tim-1.php](http://www.pft-innovaltech.fr/cpt_tim-1.php)
- [w7] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics)
- [w8] : <https://eduscol.education.fr/sti/actualites/simulation-multiphysique-avec-comsol>