

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en
Electromécanique

Thème

Etude et Modélisation d'Applications
Industrielles du Formage Electromagnétique

Présenté par :

Mr. Abderrahmen BOUSBA

Mr. Yaaqoub NEDJARI BENHADJ ALI

Encadré par :

Dr. Ilhem HAFSAOUI

Promotion 2017

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons surtout à exprimer nos remerciements à notre Encadreur Dr. Hafsaoui Ilhem enseignante et chef de département d'électrotechnique à l'université de Jijel, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de nous encadrer pour accomplir ce modeste travail de fin d'étude.

Nous tenons aussi à remercier Dr. Bali Habiba pour son aide, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous remercions les différents membres du jury Dr. Boukhnef Massaoud et Dr. Hadeif Mounir pour avoir accepté de consacrer du temps à la lecture et à l'examen minutieux de ce travail.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Dédicace

Je dédie ce projet ;

En signe de respect et de reconnaissance aux

Personnes les plus chères dans ma vie

Mon père et Ma mère

A toute la famille

A tous mes amis

A tous mes collègues et surtout aux collègues étudiants

Master 2 option : Electromécanique

Et bien sûr à mon partenaire Yaaqoub qui m'a supporté et

m'a encouragé

Abderrahmen

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma famille

Mes chers amis

*Et bien sûr mon partenaire Abderrahmen qui m'a
supporté et m'a encouragé*

Yaaqoub

SOMMAIRE

Chapitre I : Aspects Théoriques et Industriels du FEM

I.1. Introduction.....	3
I.2. Méthodes de formage à grande vitesse.....	3
I.2.1. Formage explosif.....	3
I.2.2. Formage élérohydraulique.....	4
I.2.3. Formage électromagnétique.....	5
I.3. Technologie des installations de FEM.....	8
I.3.1 Installations du FEM.....	8
I.3.2. Applications du FEM.....	11
I.3.3. Influence des divers paramètres sur la déformation.....	16
I.4. Applications industrielles.....	16
I.5. Avantages et inconvénients du FEM.....	18
I.5.1. Avantages.....	18
I.5.2. Inconvénients.....	18
Conclusion.....	19

Chapitre II : Modèles Mathématiques

II.1. Introduction.....	20
II.2. Phénomènes électromagnétiques.....	20
II.2.1. Lois de comportement.....	21
II.2.2. Conditions de passage.....	22
II.2.3. Equation électromagnétique.....	23
II.2.4. Courant de décharge.....	23
II.2.5. Calcul des courants induits.....	24

II.2.6. Forces électromagnétiques.....	24
II.2.7. Effet de peau.....	24
II.2.8. Conditions aux limites.....	25
II.3. Phénomènes mécaniques.....	25
II.3.1. Equation d'équilibre.....	25
II.3.2. Relation déformation-déplacement.....	26
II.3.3. Relation contrainte-déformation.....	27
II.3.4. Symétrie axiale.....	29
II.3.5. Conditions aux limites.....	30
II.4. Phénomènes thermiques.....	30
II.4.1. Equation thermique.....	30
II.4.2. Conditions aux limites.....	31
II.5. Couplage.....	31
II.5.1. Couplage faible.....	31
II.5.2. Couplage fort.....	31
II.5.3. Termes de couplage.....	32
II.6. Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles.....	32
II.7. Présentation du logiciel COMSOL.....	33
Conclusion.....	34

Chapitre III : Applications et Résultats

III.1. Introduction.....	35
III.2. Emboutissage de plaque.....	35
III.2.1. Installation d'emboutissage.....	35
III.2.2. Comportement de la plaque.....	38
III.2.3. Effet du nombre de spires de la bobine.....	39
III.3. Fléchissement de la plaque.....	42
III.3.1. Installation de fléchissement.....	42

III.3.2. Comportement de la plaque sous fléchissement.....	42
III.3.3. Etude paramétrique.....	44
III.4. Flambage de disque (Flanging).....	48
III.4.1. Installation de flambage.....	48
III.4.2. Flambage droit (Bending) (pliage à 90°).....	48
III.4.3. Flambage concave (Concave bending).....	51
III.4.4. Flambage convexe (Convexe Bending).....	53
III.5. Pliage (Ourlage) (Hemming).....	56
III.5.1. Pré-pliage (Prehemming).....	56
III.5.2. Ourlage (Hemming).....	60
Conclusion.....	64

Table des figures

Chapitre I : Aspects Théoriques et Industriels du FEM

Figure I.1 : Formage explosif.....	4
Figure I.2 : Formage électrohydraulique.....	5
Figure I.3 : Schéma représentatif du processus du FEM.....	6
Figure I.4 : Présentation schématique de circuit électromagnétique typique.....	7
Figure I.5 : Quelques exemples de pièces formées par FEM.....	7
Figure I.6 : Générateur de FEM.....	9
Figure I.7 : Bobine de placage (emboutissage).....	9
Figure I.8 : Bobine d'expansion.....	10
Figure I.9 : Bobine de compression.....	10
Figure I.10 : Système de soudage par impulsion magnétique.....	11
Figure I.11 : Pièces formées par Soudage électromagnétique.....	12
Figure I.12 : Exemple d'assemblage par impulsion magnétique.....	12
Figure I.13 : Compression d'un tube.....	13
Figure I.14 : Expansion d'un tube.....	13
Figure I.15 : Emboutissage d'une tôle.....	14
Figure I.16 : Principe de fléchissement.....	14
Figure I.17 : Trois types de flambage.....	14
Figure I.18 : Pliage d'une plaque métallique.....	15
Figure I.19 : Couture ou double pliage de tôles métalliques.....	15
Figure I.20 : Perlage d'une plaque métallique.....	16
Figure I.21 : Applications industrielles d'automobiles.....	17

Chapitre III : Applications et Résultats

Figure III.1 : Géométrie du système d'emboutissage.....	37
Figure III.2 : Maillage du système d'emboutissage.....	37
Figure III.3 : Courant de décharge.....	38
Figure III.4 : Déformation de la plaque et répartition de la température à $t = 3e-4$ [s].....	39
Figure III.5 : Variation de la densité de courant induite dans la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s].....	40

Figure III.6 : La force de Lorentz suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]	41
Figure III.7 : Déformation de la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]	41
Figure III.8 : Distribution de la température le long de la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]	41
Figure III.9 : Système de fléchissement	43
Figure III.10 : Fléchissement du disque et sa température à $t = 1.42e-4$ [s]	43
Figure III.11 : Déplacement de la plaque à $t = 1.42e-4$ [s]	43
Figure III.12 : Distribution de la température à $t = 1.42e-4$ [s]	44
Figure III.13 : Déplacement de la plaque avec différentes énergies au temps max	45
Figure III.14 : Distribution de la température avec différentes énergies	45
Figure III.15 : Déplacement maximal de la plaque suivant le nombre de spires	46
Figure III.16 : Distribution de la température suivant le nombre de spires	46
Figure III.17 : Déplacement de la plaque suivant la largeur du pli	47
Figure III.18 : Distribution de la température suivant la largeur du pli	48
Figure III.19 : Géométrie du système de flambage	48
Figure III.20 : Déplacement de la plaque à $t = 4.3e-5$ [s] (Cas élastoplastique $J_{ex}=2.5xJ_0$)....	49
Figure III.21 : Distribution de la température à $t = 4.3e-5$ [s] (Cas élastoplastique $J_{ex}=2.5xJ_0$)	50
Figure III.22 : Déplacement de la plaque à $t = 3e-5$ [s] (Cas isotrope $J_{ex}=3.75xJ_0$)	51
Figure III.23 : Distribution de la température à $t = 3e-5$ [s] (Cas isotrope $J_{ex}=3.75xJ_0$)	51
Figure III.24 : Maillage du système de flambage concave	52
Figure III.25 : Flambage concave à $t = 6.8e-5$ [s]	52
Figure III.26 : Formes concaves suivant le nombre de spires	53
Figure III.27 : Formes concaves avec différentes énergies	53
Figure III.28 : Maillage du système de flambage convexe	54
Figure III.29 : Flambage convexe à $t = 6.7e-5$ [s]	54
Figure III.30 : Flambage convexe suivant le nombre de spires	55
Figure III.31 : Formes convexes avec différentes énergies	55

Figure III.32 : Maillage du système de pliage.....	57
Figure III.33 : Pré pliage à $t = 3.9e-5$ [s].....	57
Figure III.34 : Pliage de la pièce en Aluminium.....	58
Figure III.35 : Pliage de la pièce en alliage d'Aluminium AL 1050.....	59
Figure III.36 : Pliage de la pièce en Magnésium.....	59
Figure III.37 : Déplacement suivant le type du matériau.....	60
Figure III.38 : Distribution de la température suivant le type du matériau.....	60
Figure III.39 : Pliage de la pièce à différents instants.....	62
Figure III.40 : Distribution de la température à $t = 3.6e-5$ [s].....	63
Figure III.41 : Ourlage de la pièce à différents instants.....	63
Figure III.42 : Distribution de la température à $t = 3.7e-5$ [s].....	64

Tableaux

Chapitre III : Applications et Résultats

Tableau III.1 : Paramètres du système d'emboutissage	37
Tableau III.2 : Caractéristiques des matériaux considérés	58

Introduction générale

Introduction générale

Les techniques de formage à grande vitesse ont été largement connues pour leur habilité de permettre la fabrication de composants complexes et le formage de métaux de grande résistance ou de faible malléabilité. Elles ont été découvertes à la fin du 18^{ème} siècle et ce domaine a été intensivement étudié dans les années 50 et 60. [1]

Le procédé de formage électromagnétique (FEM) est une technologie de formage à très grande vitesse pour les pièces métalliques, le processus est développé à la fin des années 1960. Récemment, il ya eu une augmentation de l'intérêt industriel pour son application dans la fabrication. Cet intérêt récent à comprendre le processus FEM a été stimulé par le désir d'utiliser plus d'aluminium dans les industries de l'automobile et de l'aviation. La réduction du poids des composants et du corps est généralement atteinte en utilisant des matériaux légers et des procédés de fabrication qui permettent l'application de structures à paroi mince. [2]

Le FEM est régi par des équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent tous les phénomènes mis en jeu, lors de ce processus : les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques. Toute simulation de procédés de FEM nécessite donc la résolution de systèmes d'équations différentielles complexes et non linéaires.

Le but de ce travail est de développer un modèle numérique couplé, permettant de décrire le procédé de FEM et de mieux comprendre les phénomènes physiques intervenant lors de la déformation des pièces. Les applications étudiées sont complètement industrielles, concernant surtout les procédés de pliage de tôles dans l'industrie d'automobiles. Cette technique vient d'être introduite récemment dans l'industrie des voitures et revêt un intérêt de plus en plus important.

Pour la résolution des différentes équations mathématiques régissant ces procédés, nous avons opté l'utilisation du logiciel COMSOL, un outil multi-physique, utilisant la méthode des éléments finis et permettant l'analyse du comportement aussi bien électromagnétique, mécanique que thermique, du matériau sous impulsion magnétique.

Dans ce mémoire, divers aspects de la modélisation numérique des procédés seront évoqués pour une application majeure qui est le pliage en tant que procédé de formage des tôles. Nous pourrons alors mieux apprécier l'apport de la simulation numérique dans les projets industriels dont les priorités ont également évoluées, efficacité, rentabilité, et aussi par un rapport au développement durable.

Introduction générale

Notre travail sera présenté de la manière suivante :

Dans un premier chapitre, les méthodes de formage à grande vitesse, les dispositifs de formage électromagnétique, leurs caractéristiques et diverses applications industrielles sont exposées.

Un deuxième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques et leur couplage, permettant l'élaboration des modèles numériques de simulation de plusieurs procédés de FEM utilisés dans l'industrie d'automobiles.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons nos simulations et les résultats obtenus pour plusieurs applications de FEM par le logiciel COMSOL.

Enfin, nous tirons une conclusion générale résumant notre travail.



Chapitre I

Aspects Théoriques et Industriels du FEM

I.1. Introduction

La plupart des objets métalliques ont subi une ou plusieurs opérations de mise en forme avant leur utilisation. Le formage est de donner une forme ou un modèle, de prendre forme ou de prendre forme définitive [1]. Les techniques de formage des pièces mécaniques utilisent la propriété de déformation plastique d'un matériau pour lui faire épouser une forme donnée, par un outillage approprié, sans rupture des fibres du métal.

Le processus de formage électromagnétique FEM est l'un des procédés les plus attrayants de formage à haute vitesse qui ont permis d'obtenir des nouvelles applications industrielles importantes dans le formage des métaux, comme le soudage électromagnétique, l'assemblage et le pliage. C'est une technique de formage typique sans contact, dans lequel de grandes forces peuvent être transmises à une pièce métallique conductrice par des interactions électromagnétiques pures. [2]

Ce processus de formage peut être très avantageux par rapport aux procédés de formage conventionnel. Il peut être divisé en deux grandes catégories : formage de composants tubulaires et formage de feuilles planes. [2]

I.2. Méthodes de formage à grande vitesse

Le formage à haute vitesse est obtenu par exposition d'un matériau à un champ magnétique intense sur un temps très court avec une vitesse de formage dépasse typiquement 100 m/s [1] [3]

Les méthodes de ce formage sont basées principalement sur la source d'énergie utilisée pour obtenir des grandes vitesses [1]. Parmi ces méthodes : le formage explosif, le formage électrohydraulique et le formage électromagnétique.

I.2.1. Formage explosif [2]

Le formage explosif a été reconnu comme une méthode de formage des métaux depuis plus de 100 ans. 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.

Les applications de formage explosif peuvent être divisées en deux catégories, le formage des métaux et le revêtement métallique :

- Le formage métallique comprend le formage libre et avec matrices des plaques et des tubes.
- Les opérations de contact sont communément utilisées dans le revêtement explosif des matériaux. Dans ce cas, l'explosif est éclaté à proximité de la pièce.

Les principaux éléments du formage explosif sont : les explosifs, les matrices, le milieu de transfert d'énergie (Figure I.1). En conclusion, le formage explosif peut être utilisé pour la production de composants avec une large gamme de formes et de dimensions.

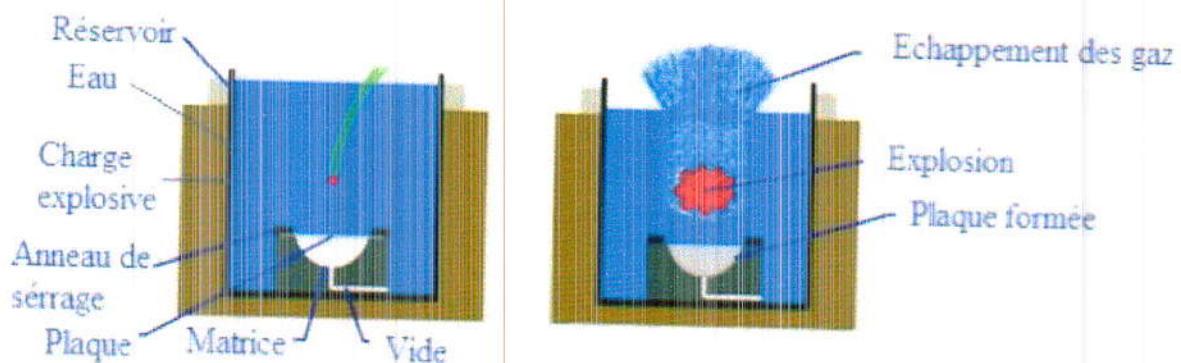


Figure I.1 : Formage explosif [4]

I.2.2. Formage électrohydraulique

Le formage électrohydraulique est une technique à très grande vitesse, il consiste à décharger une batterie de capacité dans un fil conducteur immergé dans un liquide pour produire des ondes de choc et des pressions pour le formage des métaux (Figure I.2). [1]

L'onde de choc fait passer simultanément la pièce métallique à former d'un état solide à un état viscoplastique et la projette sur la matrice, ce qui permet le formage à très grande vitesse de pièces complexes. [5]

Les bobines de champ magnétique sont remplacées par des électrodes entre lesquelles la décharge s'effectue, 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. La durée totale de la décharge est de 100 à 300 μ s suivant les caractéristiques électriques de 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 électrohydraulique est nettement meilleur que celui d'une installation de formage électromagnétique, pour une déformation identique en placage (emboutissage), l'énergie à mettre en jeu est environ deux fois moins importante en formage électrohydraulique qu'en formage électromagnétique. La vitesse générée dans le formage électrohydraulique peut dépasser 200 m/s.

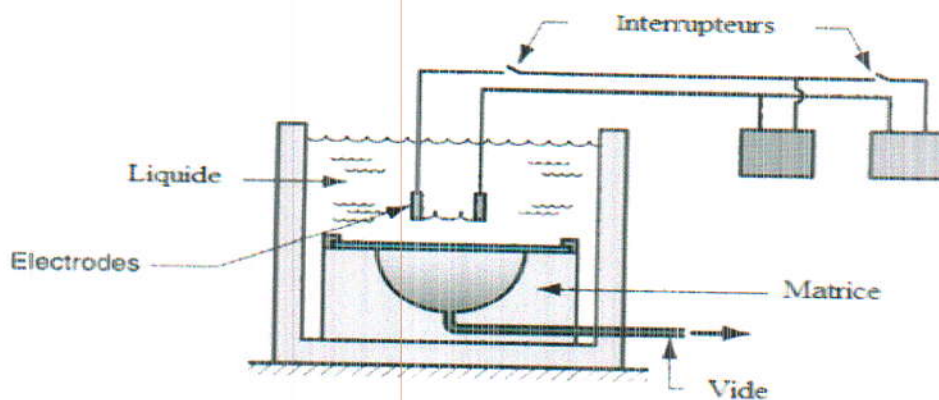


Figure I.2 : Formage électrohydraulique [6]

I.2.3. Formage électromagnétique

Le procédé de mise en forme électromagnétique est une excellente illustration du caractère multi-physique que revêt la modélisation des procédés. Récemment, ce procédé a retrouvé un intérêt industriel important. [7]

Le Formage électromagnétique est basé sur la force de Lorentz, il offre la possibilité de créer des pièces complexes, avec des détails fins. Le principe du procédé réside dans la création à l'intérieur de la pièce d'un courant induit de sens opposé qui génère des forces de répulsion entre l'inducteur et l'induit d'un niveau suffisant pour provoquer la déformation de ce dernier. [7]

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 (Figure I.3).

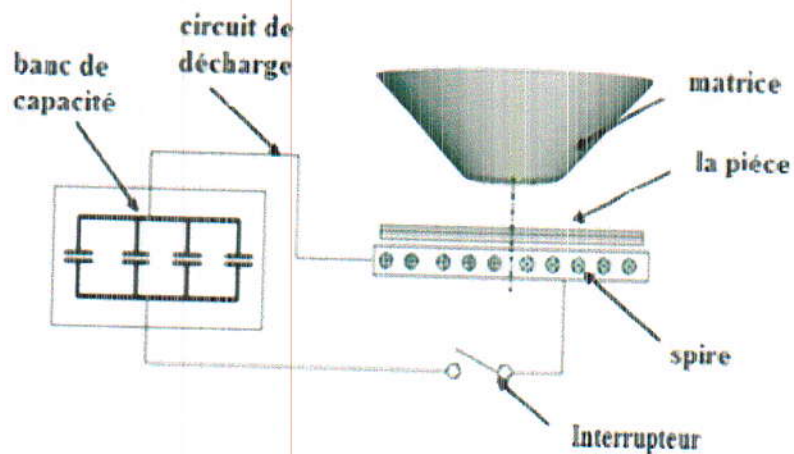


Figure I.3 : Schéma représentatif du processus du FEM [1]

Une installation expérimentale est montrée sur la figure I.4, le banc de capacités est connecté à la bobine, qui est près de la pièce. Quand l'interrupteur est fermé, un fort courant traversant l'inducteur produit un champ magnétique transitoire qui crée des courants induits dans la pièce. Les courants dans la bobine et la pièce métallique sont dans des directions opposées, selon la loi de Lenz. La répulsion électromagnétique entre ces courants opposés, régie par la force de Lorentz, fournit la force de déformation à la pièce. [1]

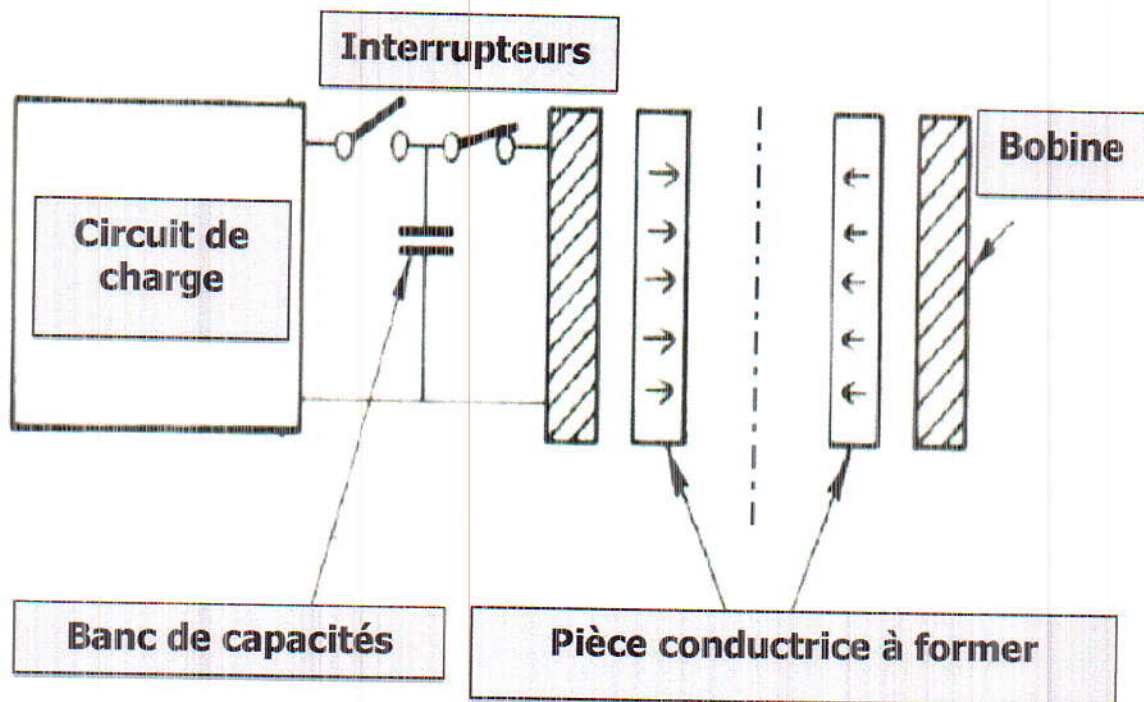


Figure I.4 : Présentation schématique de circuit électromagnétique typique [1]

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. [1]

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

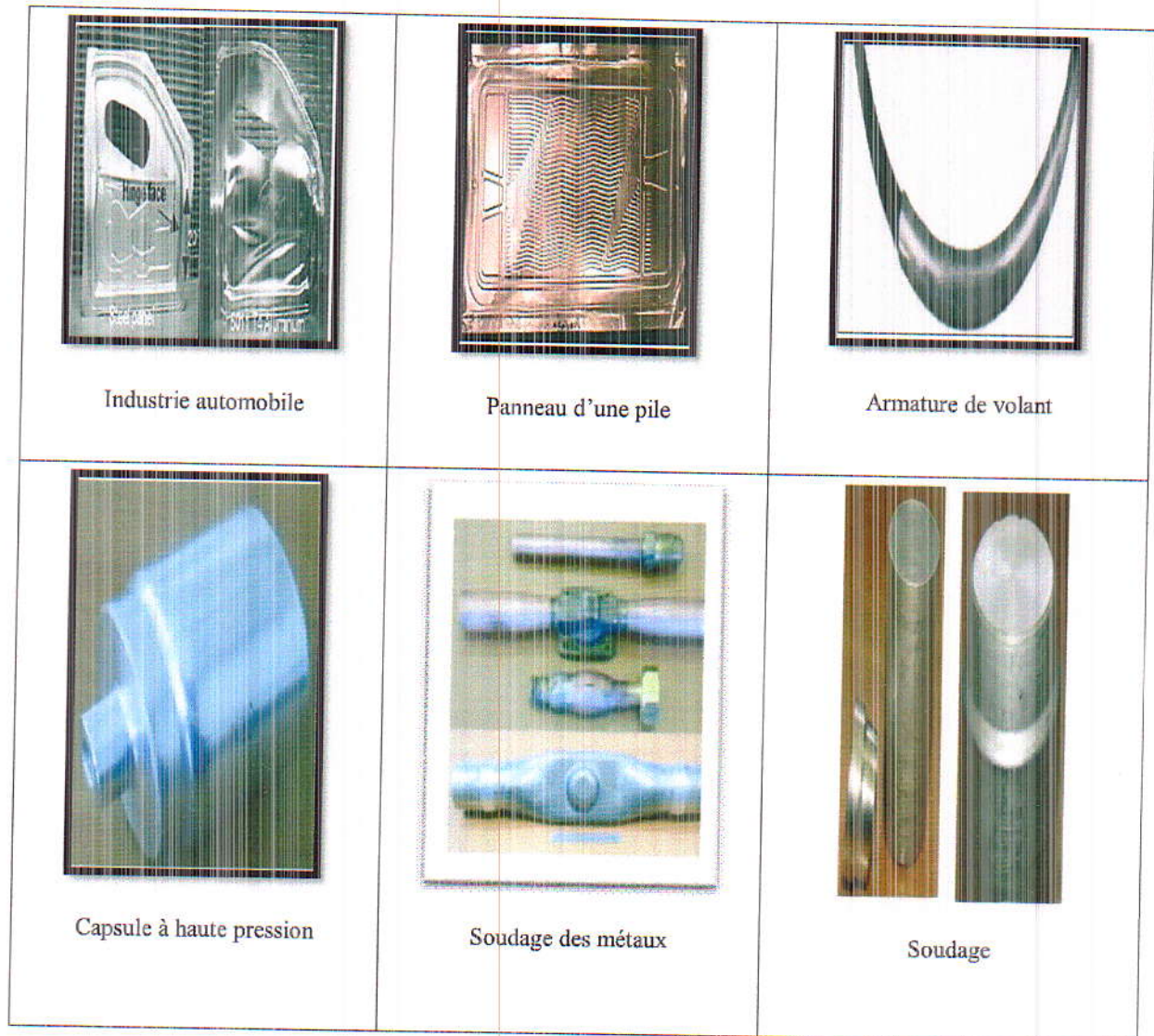


Figure I.5 : Quelques exemples de pièces formées par FEM

I.3. Technologie des installations de FEM

I.3.1 Installations du FEM

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

a) Générateurs [8]

Utilisés en formage électromagnétique et 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 condensateurs.

Un générateur est composé d'un circuit de commande qui délivre une tension primaire qui augmente progressivement jusqu'à la valeur désirée. L'énergie d'un module augmente avec le voltage puisqu'elle obéit à l'équation :

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

Avec :

V: Tension de charge [Volts].

C : Capacité de la batterie de condensateur [F].

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 adapte définit la fréquence d'oscillation et le courant dans le circuit.



Figure I.6 : Générateur de FEM [2]

b) Bobines [8]

Jouent un rôle primordial en formage électromagnétique. Elles transforment l'impulsion électrique de décharge des condensateurs en champ magnétique intense et d'autre part, en supportant les efforts magnétiques intenses, elles permettent la mise en forme des métaux sans se déformer. Elles sont généralement constituées de spires en Cuivre, Cuivre au Béryllium ou Acier inoxydable, enroulées sur un corps alliant une haute résistivité électrique à une excellente tenue mécanique.

Suivant le genre de l'opération de formage, trois types sont utilisés :

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

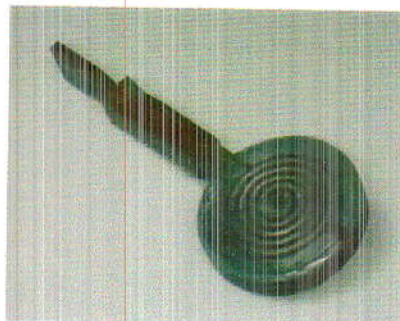


Figure I.7 : Bobine de placage (emboutissage) [7]

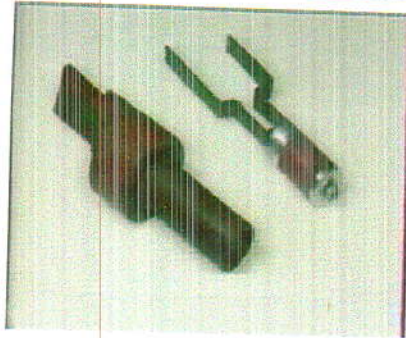


Figure I.8 : Bobine d'expansion [7]

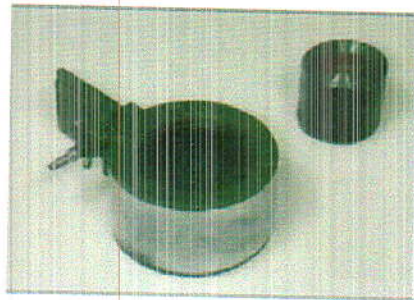


Figure I.9 : Bobine de compression [7]

✓ **Condition de base des bobines pour FEM [1]**

Une bobine doit assurer :

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

c) **Matrice [1]**

La mise en forme des pièces est généralement obtenue en utilisant des matrices. La pièce propulsée par l'effet des forces électromagnétiques vient épouser la forme de la matrice placée à proximité de la pièce. Etant donné que le placage des pièces contre les matrices se fait à haute

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

D'autre part, les grandes vitesses de déplacement atteintes par les pièces au moment du placage rendent prépondérants les phénomènes d'inertie et l'on peut, pour certaines applications posant des problèmes de démoulage, employer des matrices en matière souple (élastomères ou polyuréthanes) qui se comportent comme un corps rigide face au métal lancé à grande vitesse.

I.3.2. Applications du FEM

a) Soudage

La technologie du soudage électromagnétique à grande vitesse (ou soudage par impulsion magnétique), est un nouveau procédé d'assemblage très innovant, actuellement en plein développement et basé sur l'utilisation des forces électromagnétiques destinées à souder des pièces métalliques [9]. Il est présent dans l'ensemble des secteurs industriels [7] :

- Le transport terrestre (automobile, ferroviaire, machines agricoles et de construction).
- La construction navale (structures off-shore, navires, sous-marins).
- L'énergie (hydroélectricité, nucléaire, gaz et pétrole, équipements électriques et électroniques).
- L'aéronautique.

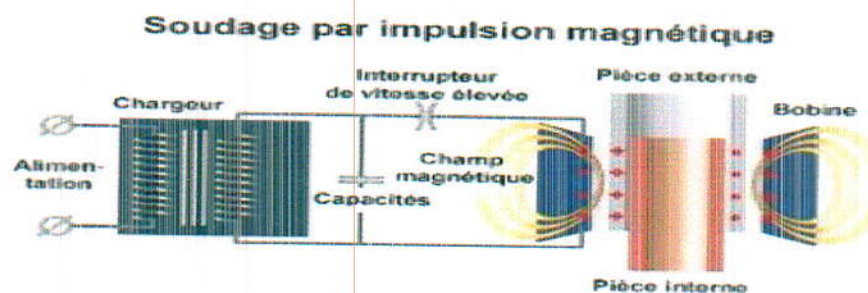


Figure I.10: Système de soudage par impulsion magnétique [10] [11]

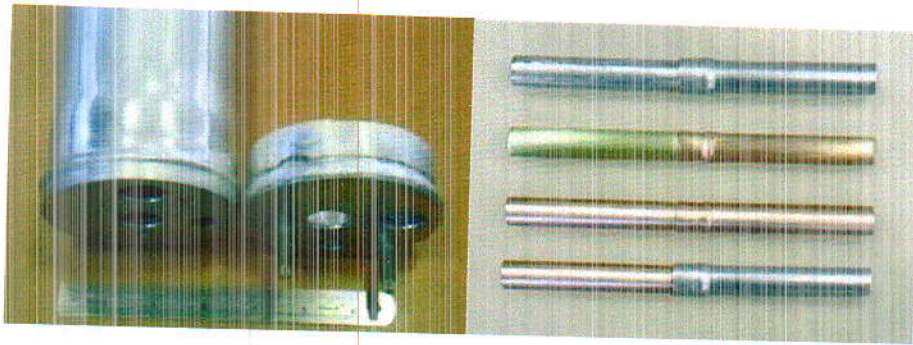


Figure I.11 : Pièces formées par Soudage électromagnétique

b) Assemblage

L'assemblage est un procédé de formage électromagnétique, il est destiné à assembler deux ou plusieurs matériaux qui sont sertis en compression ou en expansion.

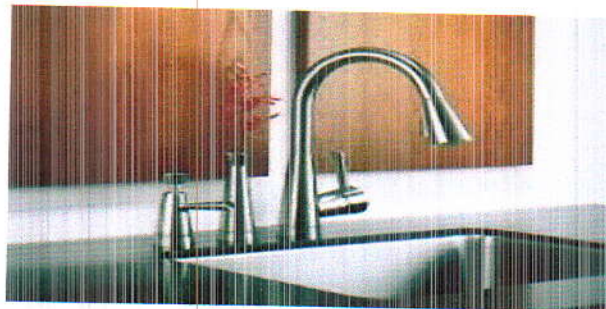


Figure I.12 : Exemple d'assemblage par impulsion magnétique

c) 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 [12]. On distingue plusieurs opérations essentielles qui sont :

✓ Compression

Dans cette configuration, la pièce tubulaire à former, est introduite à l'intérieur d'une bobine, de manière coaxiale. Le tube conducteur est alors le siège d'un courant induit parallèle et de sens opposé au courant inducteur. Le champ magnétique résultant exerce sur le courant induit une force radiale dirigée vers l'intérieur, dépassant largement la limite élastique du métal.

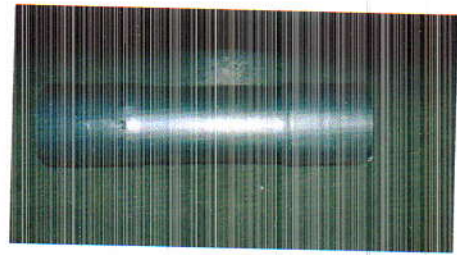
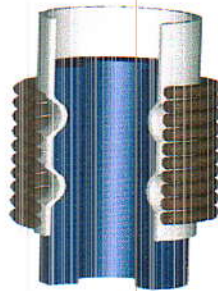
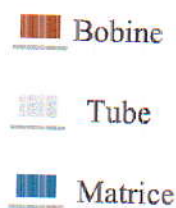


Figure I.13 : Compression d'un tube [13]

✓ Expansion

La bobine utilisée est placée à l'intérieur d'un tube de manière coaxiale. Le champ magnétique créé par la bobine induit un courant dans la pièce, créant des efforts électromagnétique qui assurent l'expansion de tube. [13]

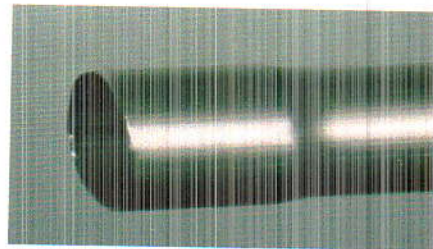
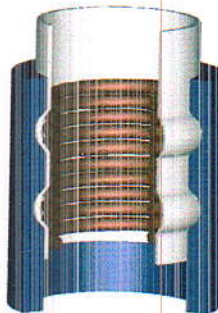
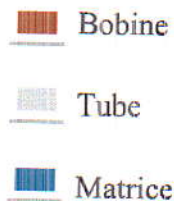


Figure I.14 : Expansion d'un tube [13]

✓ Emboutissage (Placage) [1]

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince une forme creuse de géométrie plus ou moins complexe. Dans le cas le plus simple, la pression est produite par une bobine roulée dans une crêpe à spirale plate. Cette bobine est placée au-dessus ou en dessous de la pièce. La forme de la feuille est généralement donnée par une matrice, mais dans le cas d'un processus de flambage libre, la matrice n'est pas nécessaire pour former la feuille.

L'emboutissage est un procédé de fabrication très utilisé dans l'industrie automobile, dans l'électroménager, etc.

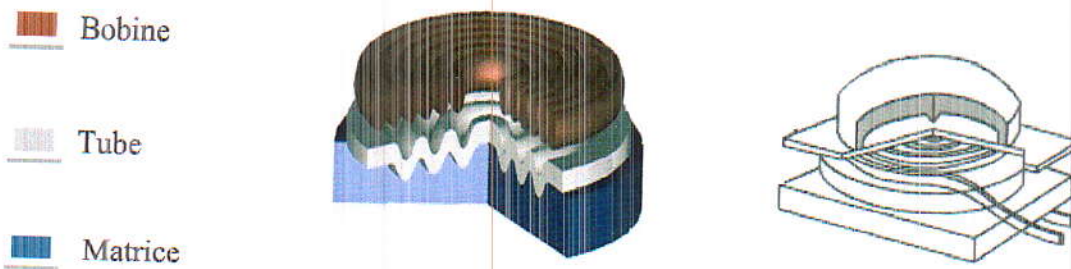


Figure I.15 : Emboutissage d'une tôle [13]

✓ **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, parmi lesquelles : le flambage, le pliage, la couture et le perlage. [14]

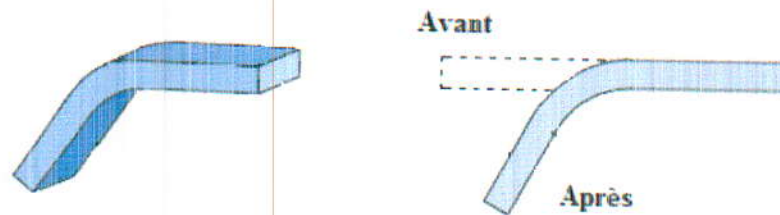
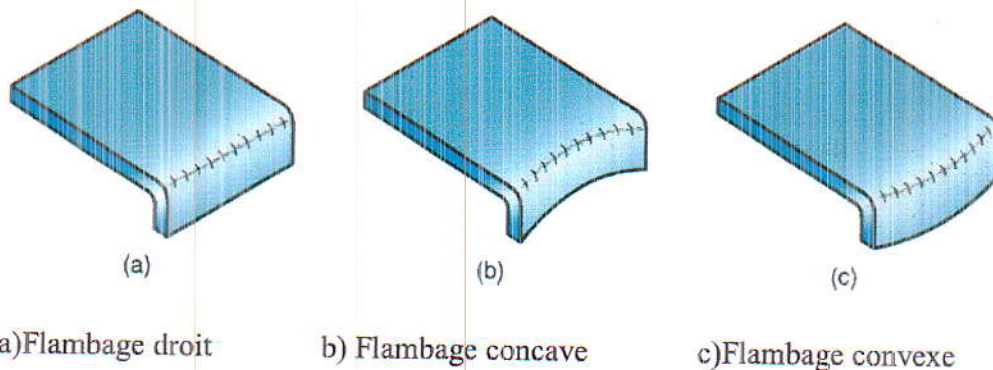


Figure I.16 : Principe de fléchissement [14]

✓ **Flambage (Flanging)**

Il se caractérise par le fait que le bord de la pièce est fléchi avec un angle de 90 degré. On distingue : le Flambage droit, concave et convexe.



a) Flambage droit

b) Flambage concave

c) Flambage convexe

Figure I.17 : Trois types de flambage [14]

✓ **Pliage (Hemming)**

Cette opération permet de plier le bord d'une plaque sur lui-même ou sur une tôle [14].

Il sert pour plusieurs fonctions: augmenter la rigidité et la raideur de la pièce, éliminer le bord aigu, améliorer l'apparence des bords du panneau très visibles et rejoindre les parties intérieure et extérieure. [15]

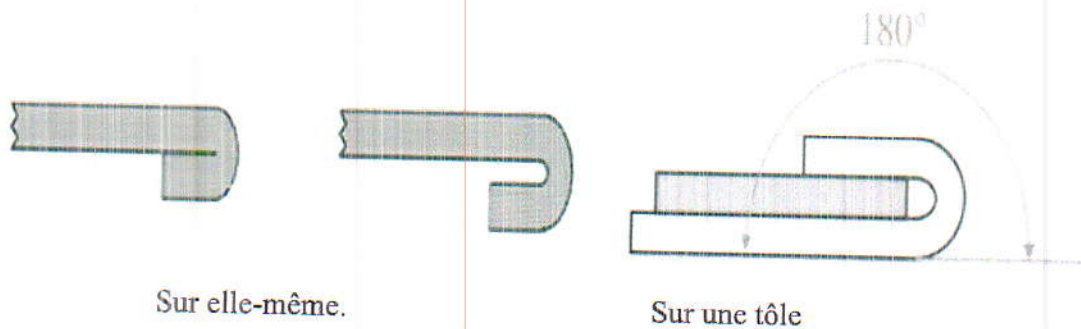


Figure I.18 : Pliage d'une plaque métallique [15]

✓ **Couture (Seaming)**

Une autre technique de fléchissement de tôles métalliques et qui est de plus en plus utilisée dans l'industrie de véhicules par formage électromagnétique est le "Seaming". C'est une opération de pliage dans laquelle deux bords de tôle sont réunis.

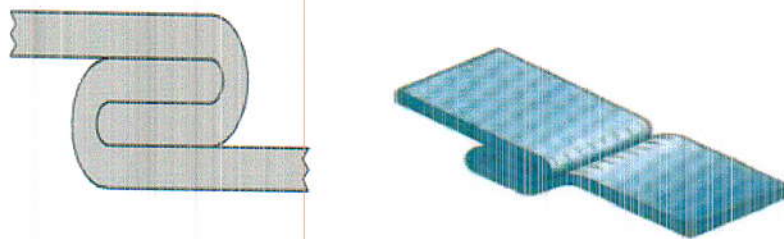


Figure I.19 : Couture ou double pliage de tôles métalliques [14]

✓ **Perlage (Beading)**

Le perlage forme les bords de la pièce en un rouleau ou une boucle. Il est également utilisé pour la sécurité, la force et l'esthétique. Il est utilisé pour la fabrication des charnières et des casseroles. [14]

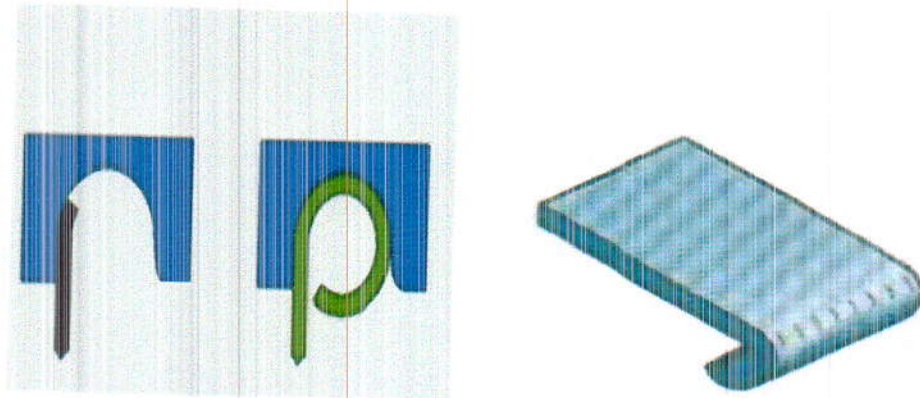


Figure I.20 : Perlage d'une plaque métallique [14]

I.3.3. Influence des divers paramètres sur la déformation [16]

Les différents paramètres influant sur la déformation sont :

- Nombre de spires de la bobine de champ.
- Ductilité du métal.
- Fréquence de travail.
- Epaisseur de la pièce.
- Distance entre la bobine et la pièce.
- Résistivité de la pièce.
- Intensité du courant de décharge.

I.4. Applications industrielles

La nécessité de baisser la consommation de carburant présente constamment de nouveaux défis aux ingénieurs de l'automobile. Il leur incombe de combiner l'acier à des matériaux plus légers comme l'Aluminium et le Magnésium, mais ils ont aussi besoin de géométries de plus en plus complexes pour améliorer les performances aérodynamiques, augmenter l'efficacité du groupe autopulseur et adopter des carburants de substitution. [17]

Le formage électromagnétique utilise la physique des particules comme technique permettant de remodeler les parties métalliques. Son application a été conçue pour être directement utilisée par l'industrie automobile. La réduction du poids des véhicules (en appliquant le procédé aux pièces métalliques des automobiles) devrait participer à la réduction des émissions de CO₂. Cela devrait permettre d'axer les stratégies de production d'automobiles

vers la conception de voitures plus écologiques, sans coûts supplémentaires, que ce soit pour le fabricant ou pour le consommateur. [18]

La technique de FEM fournit un outil intéressant qui permet de développer la déformation des matériaux dans les limites de travail. Les applications industrielles les plus récentes et les plus innovantes où les recherches se sont concentrées sont essentiellement celles concernant la carrosserie des voitures (Figure I.20) :

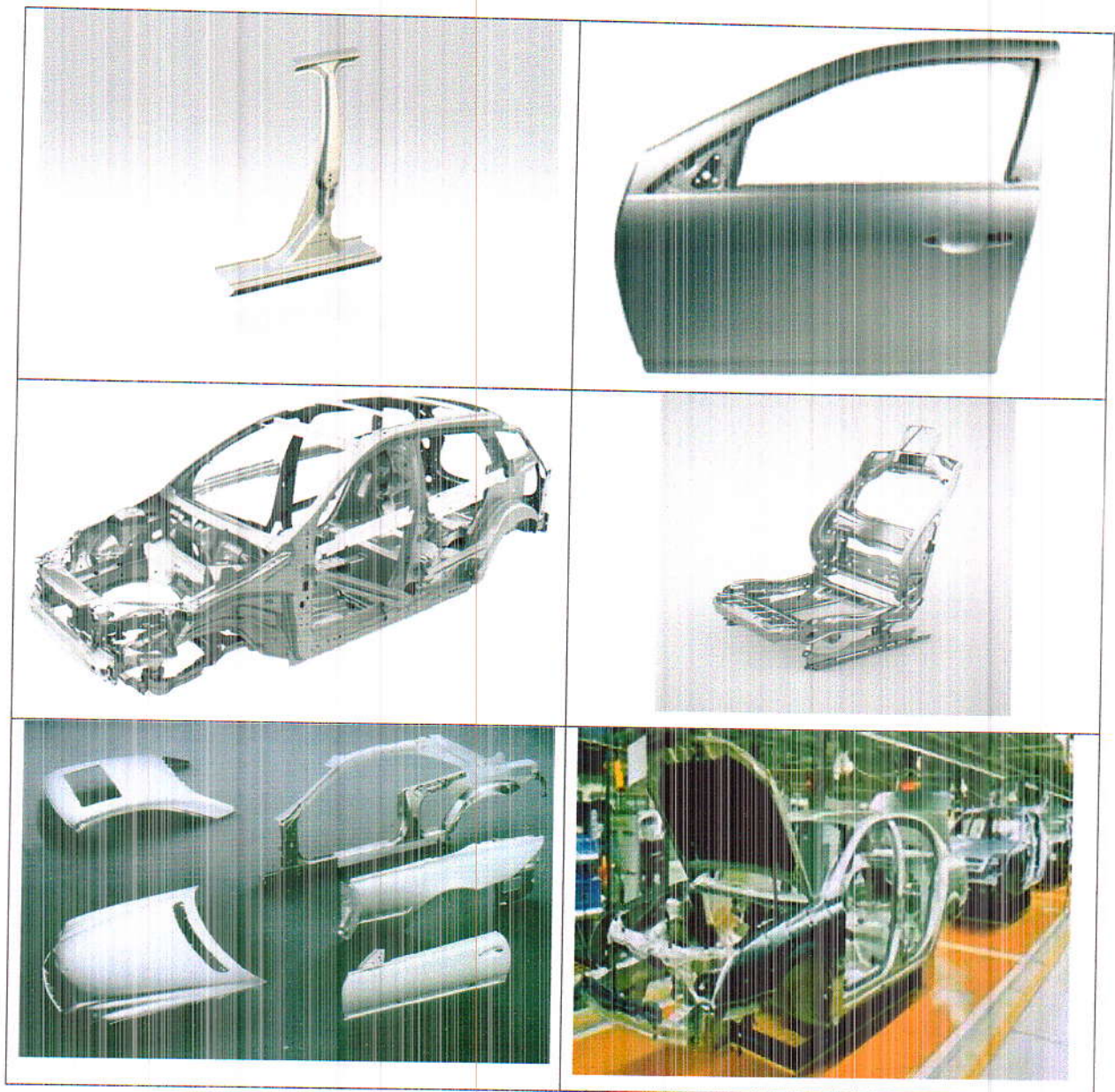


Figure I.21 : Applications industrielles d'automobiles [18]

I.5. Avantages et inconvénients du FEM [2] [1]

I.5.1. Avantages

- Une précision dimensionnelle très élevée.
- Consommation d'énergie inférieure de 30-50% par rapport aux procédés conventionnels.
- La possibilité de réaliser des assemblages.
- Le procédé assure une ductilité et une déformabilité plus élevées des pièces.
- Lors du formage par impulsion magnétique, le matériau est déformé plastiquement ce qui a pour résultat une déformation permanente; le retour à l'état initial est ainsi évité.
- Une technologie de traitement très souple. Le même circuit peut être utilisé pour former des pièces de différentes configurations.
- Réduction des coûts et des composants.
- Procédé économique en énergie et non polluant.
- Absence de corrosion dans la zone soudée.
- Meilleure conductibilité dans la zone soudée.
- C'est un processus propre puisqu'aucun lubrifiant n'est nécessaire.
- Des tolérances dimensionnelles très proches sont réalisables.
- Haute productivité (car le temps moyen de l'opération est d'environ 100-300 μ s).
- Les rides sont supprimées.

I.5.2. Inconvénients

- La technologie à son état actuel ne permet pas d'être appliquée à des feuilles de grandes dimensions, en particulier en raison de la conception des bobines d'induction et de l'exigence d'énergie, qui se traduisent par des bancs de condensateurs plus importants et des dépenses initiales plus élevées.
- Restrictions géométriques.
- Les matériaux à faible résistivité peuvent être facilement formés, comme le Cuivre, l'Aluminium, les aciers à faible teneur en carbone etc. Si des matériaux de haute résistivité doivent être utilisés, le coût du processus peut être comparativement plus élevé.
- La vitesse de déformation peut être considérée comme une limitation du processus en raison des précautions et des exigences de sécurité plus élevées.

- En pratique, ses applications sont plutôt limitées aux formes plus simples (tubes et tôles).. Par exemple, le procédé est pratique pour les métaux avec de petites épaisseurs.
- Seulement les matériaux les bons conducteurs d'électricité peuvent être déformés directement. Pour les matériaux non conducteurs, une pièce conductrice intermédiaire doit être requise. Actuellement, on a recours aux peintures métalliques.

Conclusion

De cette étude contextuelle, il ressort que cette technique de formage électromagnétique se distingue par son processus à grande vitesse qui permet, des applications de formage soudures non réalisables autrement, son exploitation industrielle devient de plus en plus possible et se développe pour des applications de plus en plus complexes.

Le principe de l'impulsion électromagnétique a surtout été étudié expérimentalement. Du point de vue numérique, ce procédé a été surtout étudié à travers son mode d'utilisation en configuration formage.

Il est donc nécessaire de développer un outil numérique qui couple les différentes physiques mises en jeu lors du FEM, à savoir principalement, l'électromagnétisme, la mécanique et la thermique, et permettre une analyse complète du processus afin d'affiner les études sur les divers paramètres processus et ce pour divers matériaux.

Pour cela, ce mémoire présente un modèle éléments finis, utilisant le logiciel COMSOL, permettant d'analyser différentes applications industrielles du FEM, particulièrement des applications de pliages de tôles, utilisées en industrie d'automobiles.

Le prochain chapitre s'intéresse tout d'abord au développement des différents modèles mathématiques et numériques qui régissent les phénomènes mis en jeu dans ces procédés de pliage par impulsion magnétique.

Chapitre II

Modèles Mathématiques

II.1. Introduction

Le formage électromagnétique est un procédé de mise en forme des métaux à grande vitesse de déformation, provoquant la déformation plastique d'une pièce, résultant de l'interaction entre les champs électromagnétiques.

Ce chapitre se concentre sur le développement des différentes formulations mathématiques régissant tous les phénomènes mis en jeu lors des procédés de FEM, dans le but d'établir les modèles numériques nécessaires pour la simulation de différentes applications industrielles du FEM.

II.2. Phénomènes électromagnétiques [19]

Les phénomènes électromagnétiques font apparaître des couplages entre le champ électrique et le champ magnétique. Ces observations expérimentales sont exprimées sous forme mathématique par les équations de Maxwell. Ce sont des équations d'équilibre valables en toutes circonstances. Elles sont indispensables à la modélisation de tout phénomène électromagnétique.

Les équations de Maxwell, permettent de décrire la propagation d'ondes électromagnétiques dans un cas général, elles sont données sous la forme différentielle suivante :

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

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

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

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

Avec:

\overline{H} : Champ magnétique [A/m].

\overline{B} : Induction magnétique [T].

\overline{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

\vec{D} : Induction électrique [A.S/m²].

ρ : Densité de charge [C/m²].

II.2.1. Lois de comportement [19] [20]

En plus des équations de Maxwell, la modélisation du comportement électromagnétique des matériaux, passe par l'utilisation de lois de comportement. Elles définissent la réponse du milieu face à une sollicitation (électrique, magnétique, mécanique, thermique ...). Les lois de comportement nécessaires à la modélisation du comportement électromagnétique utilisées ici sont linéaires et découplées :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (\text{II.5})$$

Où :

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

Avec :

\vec{J} : Densité de courant surfacique [A/m].

\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.

Les cinq vecteurs précédents sont liés entre eux par les caractéristiques des milieux (conductivité électrique, perméabilité magnétique,...) à travers les équations exprimant les lois du comportement du milieu.

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

Avec :

σ : Conductivité électrique [S/m].

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

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

μ_r : Perméabilité relative.

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

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.9})$$

Avec :

\vec{B}_r : Induction rémanente [T] et μ_a : Perméabilité magnétique de l'aimant [H/m].

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

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

Avec :

ε : Permittivité électrique [F/m].

II.2.2. Conditions de passage [20]

Chaque deux milieux magnétiques de propriétés physiques différentes ont leurs conditions de passage d'un milieu à l'autre, ces conditions sont traduites par les équations:

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

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

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

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II.12})$$

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

$$(\vec{J}_1 - \vec{J}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

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

II.2.3. Equation 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 du dispositif de FEM.

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

$$-div\left(\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \vec{v}(\overline{rot A}) + \sigma \overline{grad V} - \overline{Jex}\right) = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{rot}(\mu^{-1} \overline{rot A}) - \sigma \vec{v}(\overline{rot A}) + \sigma \overline{grad V} = \overline{Jex} \quad (\text{II.15})$$

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

$$\vec{A} = \bar{A} + \overline{grad V} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, nous obtenons :

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \overline{rot}(\mu^{-1} \overline{rot A}) - \sigma \vec{v}(\overline{rot A}) = \overline{Jex} \quad (\text{II.17})$$

II.2.4. Courant de décharge

Le courant de décharge du banc de capacités est donné par :

$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi \omega_0 t) \sin 2\pi f t \quad (\text{II.18})$$

$$\xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \text{ Et : } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{Lc}}$$

Avec :

ξ : Coefficient d'amortissement.

ω_0 : Pulsation propre [rad/s].

V_0 : Tension de générateur [Volts].

C : Capacité électrique [F].

L : Inductance [H].

II.2.5. Calcul des courants induits [1]

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

$$\overline{J}_{IND} = -\sigma \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} + \sigma \overline{v} \cdot \text{rot}(\overline{A}) \quad (\text{II.19})$$

II.2.6. Forces électromagnétiques [1]

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

$$\overline{F} = \overline{J} \wedge \overline{B} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

\overline{F} : Force électromagnétique [N/m³].

\overline{J} : Densité de courant de décharge [A/m²].

\overline{B} : Densité de flux magnétique [T].

II.2.7. Effet de peau [19]

On appelle effet de peau le phénomène qui engendre la concentration des champs à la surface d'un milieu conducteur traversé par un courant alternatif. La décroissance des champs dans un matériau conducteur se fait en fonction de l'épaisseur de peau δ , qui s'écrit dans ce cas :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (\text{II.21})$$

Où :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_T}} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

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

ω : Pulsation du courant inducteur $2\pi f$ [rad/s].

L : Inductance du circuit [H].

C_T : Capacité du condensateur [F].

II.2.8. Conditions aux limites

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

- Potentiel magnétique est nul sur l'axe de symétrie.
- Isolation magnétique sur les frontières de la boîte d'air considérée.

II.3. Phénomènes mécaniques [21] [22] [23]

II.3.1. 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 :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

ρ : Densité [Kg/m^3].

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

σ : Tenseur de contraintes [N/m].

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

II.3.2. Relation déformation-déplacement

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

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (\text{II.24})$$

Avec :

ε_{el} : Déformation élastique et ε_p : Déformation plastique.

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

α : Coefficient d'expansion thermique.

T : Température [K].

T_{ref} : Température de référence (ambiante) [K].

Dans notre modélisation des systèmes de formage magnétique, la déformation thermique n'est pas considérée, du fait que les variations de température durant le processus de FEM ne sont pas très excessives.

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.3.3. Relation contrainte-déformation

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

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

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 donnée par:

$$\sigma = D_{\varepsilon_d} + \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_{ih} - \varepsilon_p - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

E : Le module de Young [Pa].

ν : Le coefficient de Poisson.

ε_0 : La Contrainte initiale [Pa].

b) Cas Isotrope

Dans ce cas la matrice D est différente de la précédente, elle est sous la forme:

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Et :

$$\sigma = D_d \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{xy0} \\ \varepsilon_{yz0} \\ \varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (\text{II.29})$$

Avec:

$$D_d = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

II.3.4. Symétrie axiale [1]

En symétrie axiale, les coordonnées cylindriques r, θ et z sont utilisées. Dans ce cas, le déplacement dans la direction θ , 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 θ 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.3.5. 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.

II.4. Phénomènes thermiques [24] [25] [26]

II.4.1. Equation thermique

Afin d'analyser la distribution de la température dans les pièces déformées par FEM, nous avons introduit l'équation thermique qui permet d'analyser le phénomène thermique dû à l'effet de Joule.

La répartition des températures à chaque instant est la solution de l'équation du bilan énergétique:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-k \overline{\text{grad}T}) = Q + q_s.T \quad (\text{II.31})$$

Avec :

T : Température [K].

K : Conductivité thermique [W/m.k].

ρ : Densité [Kg/m³].

C_p : Capacité calorifique [J/Kg.K].

Q : Source de chaleur .dans notre cas, elle est représentée par la chaleur dégagée par effet Joule [W].

q_s : Coefficient d'absorption ($q_s = 0$).

II.4.2. Conditions aux limites

Dans le problème thermique, nous considérons deux types de conditions aux limites sur la pièce qui est en contact avec l'air environnant et donc un flux convectif est considéré sur toutes les frontières de la pièce, et un axe de symétrie ($r = 0$).

II.5. Couplage

II.5.1. 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.

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 global (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. 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.

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 :

$$Q = \frac{1}{2\sigma} J^2 \quad (\text{II.32})$$

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.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \overline{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.33})$$

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. Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes (densité du courant, densité de la puissance dissipée) sont connues à l'avance, ces méthodes sont : [27]

- Les méthodes analytiques.
- Les méthodes numériques.

Notre travail est basé sur les méthodes numériques qui transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. [27]

Parmi les méthodes numériques existantes, nous citons [28] :

- Méthode des volumes finis (MVF).
- Méthode des différences finies (MDF).
- Méthode des circuits couplés (MCC).
- Méthode des intégrales de frontières (MIF).
- Méthode des éléments finis (MEF).

Parmi les méthodes citées, nous utilisons la méthode des éléments finis, car elle est la méthode utilisée par le logiciel COMSOL, elle est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) surtout dans les géométries complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnement. [27]

II.7. Présentation du logiciel COMSOL [29]

Tous les modèles numériques sont développés sous environnement COMSOL, qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en sciences physiques et en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques 2D et 3D.

COMSOL multi-physique autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP).

L'application de ce logiciel pour résoudre de tel problèmes est basée sur les étapes suivantes :

- 1) Choix du mode de résolution 2D.
- 2) Choix du type de problème lié à l'application (AC/DC dans notre cas).
- 3) Construction du domaine d'étude.
- 4) Introduction des propriétés physiques liées à chaque milieu et à chaque problème.
- 5) Introduction des conditions aux limites pour tous les problèmes considérés.
- 6) Maillage du domaine d'étude et contrôle de sa qualité.
- 7) Choix du régime de résolution stationnaire ou temporel et la méthode utilisée.
- 8) Résolution et exploitation des résultats.

Conclusion

Toutes les formulations mathématiques ainsi présentées, seront décrites numériquement en développant des modèles numériques éléments finis, sous logiciel COMSOL, permettant de simuler différentes applications industrielles de pliage magnétique.

Ces modèles numériques couplant fortement les trois types de phénomènes, électromagnétiques, mécaniques et thermiques traiteront des applications industrielles et permettront de retrouver les résultats expérimentaux de l'industrie. [15] [30]

Chapitre III

Applications et Résultats

III.1. Introduction

Notre objectif est de développer un modèle numérique simple mais précis, couplant les trois phénomènes mis en jeu (électromagnétique, mécanique et thermique), qui puisse simuler différentes applications du formage électromagnétique, particulièrement des applications industrielles réelles dans la fabrication des voitures.

De ce fait, les modèles mathématiques développées dans le chapitre précédent sont formulés numériquement et validés pour différents dispositifs industriels de formage par impulsion magnétique de tôles minces. Tous les modèles sont développés sous environnement COMSOL, logiciel multi-physique utilisant la méthode des éléments finis.

Les différents résultats obtenus sont présentés et interprétés dans ce chapitre.

III.2. Emboutissage de plaque

La technique d'emboutissage des plaques métalliques est un processus industriel très important grâce à son taux de production élevé et son faible coût. C'est une technologie fondamentale dans la fabrication d'automobiles.

Afin de valider notre modèle numérique, nous avons commencé par analyser un problème type de formage de pièces planes, qui est un système d'emboutissage de plaque, qui sera considéré comme la base des autres dispositifs industriels, analysés par la suite.

III.2.1. Installation d'emboutissage

Le dispositif du magnétoformage destiné à l'emboutissage (Figure III.1) est le même dispositif expérimental [30] comportant une bobine spirale en cuivre, formée par 3 spires circulaires au-dessous d'un disque mince en Aluminium, fixé en son extrémité et dont les paramètres sont représentés dans le tableau III.1.

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

La géométrie analysée est discrétisée en 4828 éléments triangulaires du second ordre et 2454 nœuds (Figure III.2). Pour la discrétisation temporelle, le pas de temps est pris égal à $1\mu\text{s}$. Le déplacement et la déformation de la pièce sont pris en compte par remaillage à chaque pas de temps.

Comme notre modèle numérique est avec attaque courant, nous avons utilisé un courant de même forme que celui utilisé expérimentalement [30] (Figure III.3), dérivé par le circuit de décharge dont les paramètres figurent sur le tableau III.1.

Il est donné par l'équation suivante :

$$J_0 = 4.5558e10 * \exp(-6372.79 * t) * \sin(1.1180e5 * t) \quad (\text{III.1})$$

Nombre de spires N	3
Rayon de la bobine	20 [mm]
Section d'une spire	6.362*e-7 [m ²]
Conductivité électrique de la bobine σ	5.998e7 [S/m]
Perméabilité μ_0	4*pi e-7 [H/m]
Rayon de la plaque	40 [mm]
Epaisseur de la plaque	0.5 [mm]
Conductivité électrique de la plaque σ	3.774e7 [S/m]
Résistance R	25.5 [m Ω]
Inductance L	2 [μ H]
Capacité C	40 [μ F]
Fréquence f	17803 [Hz]
Tension V_0	6470.52 [Volts]
Energie E	0.84 [KJ]

Tableau III.1 : Paramètres du système d'emboutissage

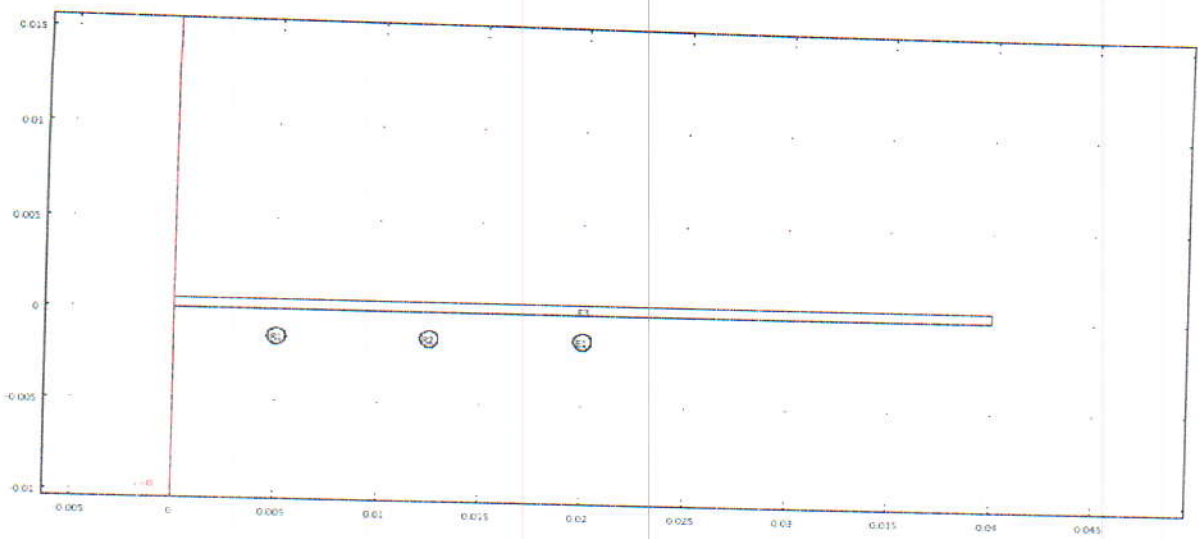


Figure III.1 : Géométrie du système d'emboutissage

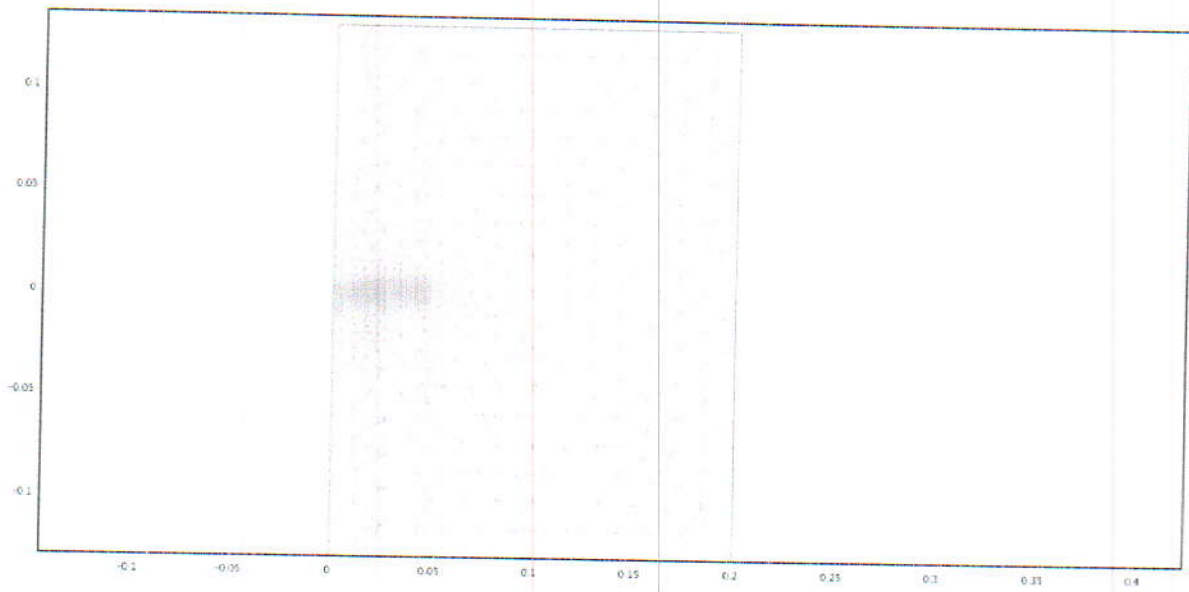


Figure III.2 : Maillage du système d'emboutissage



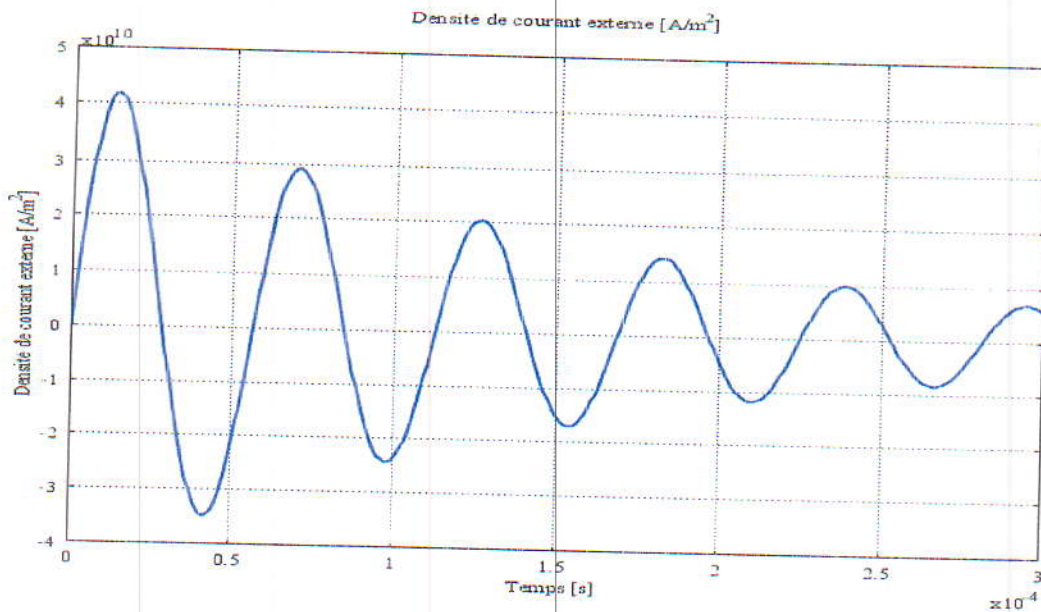


Figure III.3 : Courant de décharge

III.2.2. Comportement de la plaque

Les résultats du modèle numérique (Figure III.4) montrent une déflexion de la plaque tout à fait prévue expérimentalement [30]. Un déplacement maximal d'environ cinq millimètres est trouvé au niveau de l'axe de symétrie à l'instant 300 μ s.

Pour ce qui est de l'échauffement de la pièce formée, les résultats du modèle numérique couplé sont prévus théoriquement, puisque les zones les plus chaudes sont celles qui sont directement en face des spires de la bobine et donc celles qui sont traversées par les plus forts courants induits puisque la seule source de chaleur est l'effet Joule au niveau de la pièce conductrice.

Ces résultats ainsi validés, permettent de montrer l'habileté du modèle numérique développé à prévoir le comportement aussi bien électromagnétique que mécanique et thermique de la plaque formée magnétiquement.

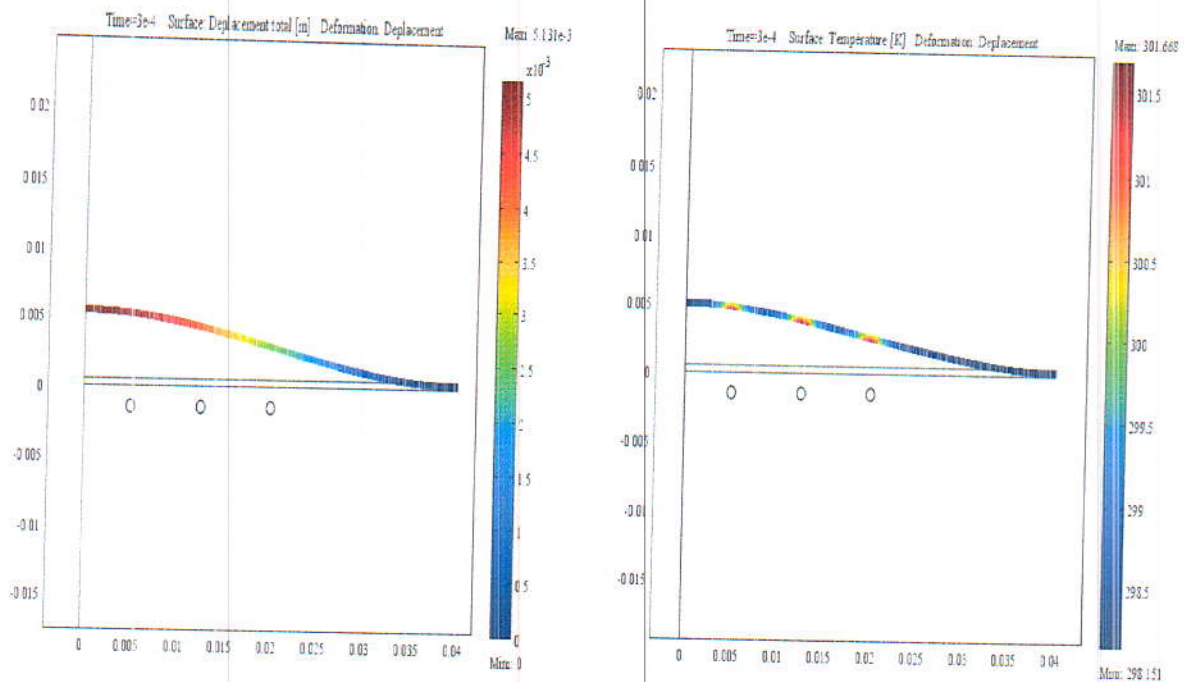


Figure III.4 : Déformation de la plaque et répartition de la température à $t = 3e-4$ [s]

III.2.3. Effet du nombre de spires de la bobine

Afin d'examiner l'effet du nombre de spires de la bobine de formage sur la formabilité de la pièce, nous avons considéré le même dispositif précédent (Figure III.1) mais avec différentes bobines de même rayon à trois, cinq et sept spires.

En utilisant le même courant inducteur (Figure III. 3), les courants induits créés par les différentes bobines dans le disque à $t=300\mu s$ (Figure III. 5) sont d'autant plus forts que le nombre de spires. Les mêmes remarques sont pour les forces électromagnétiques maximales (Figure III. 6) soumises à la pièce et par conséquent, les déflexions maximales (Figure III. 7) et la température le long de la pièce à former (Figure III. 8). La déflexion totale du disque semble être améliorée avec les inducteurs à grand nombre de spires. Ces résultats sont bien confirmés expérimentalement par d'autres auteurs [30] [15]. Le comportement de la pièce aussi bien électromagnétique que mécanique et thermique est amélioré par l'augmentation du nombre de spires de la bobine de formage.

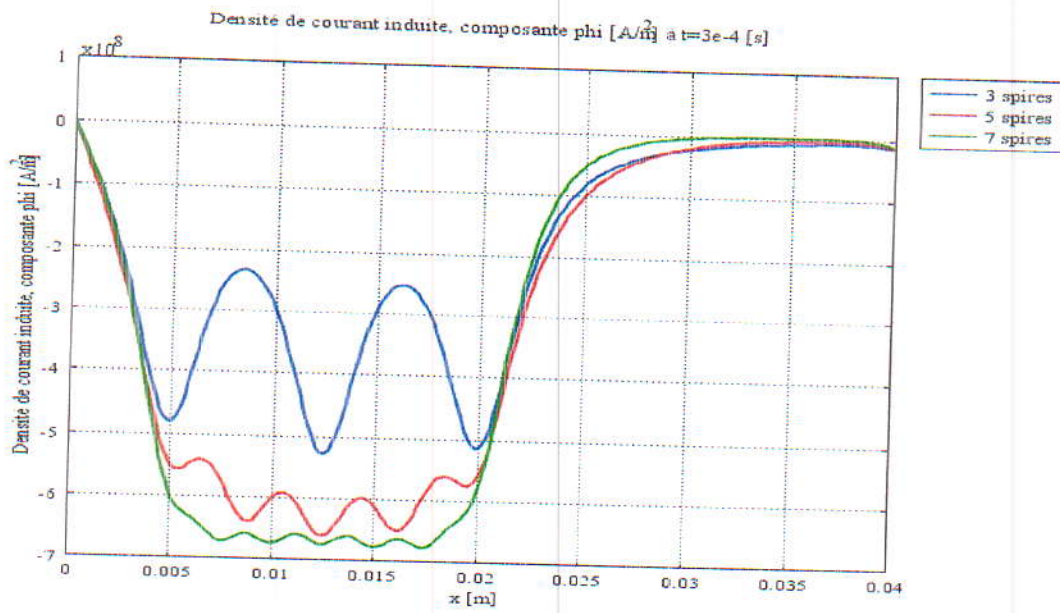


Figure III.5 : Variation de la densité de courant induite dans la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]

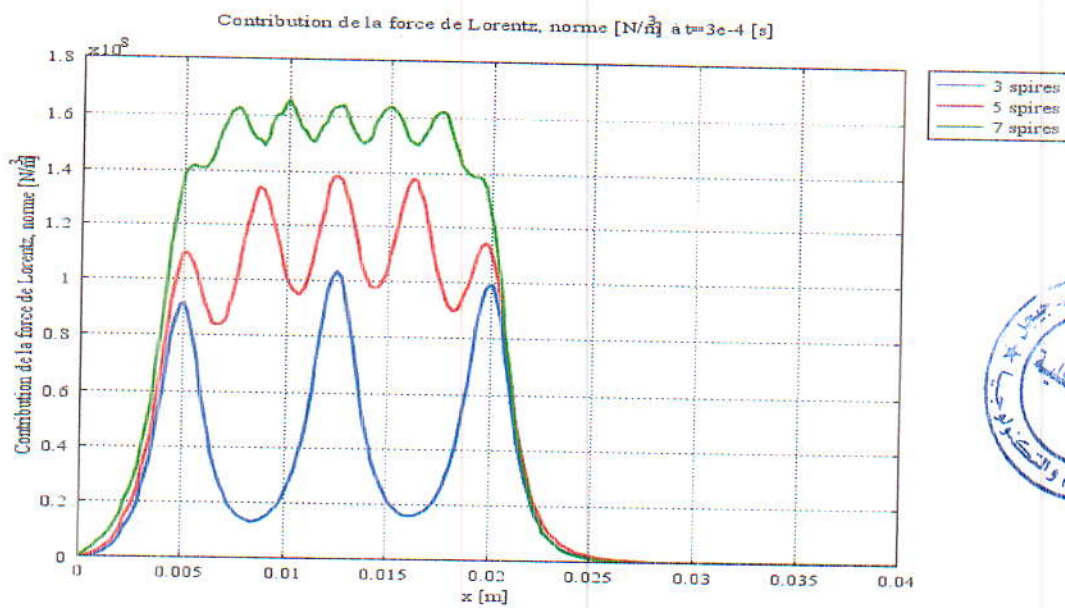


Figure III.6 : La force de Lorentz suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]



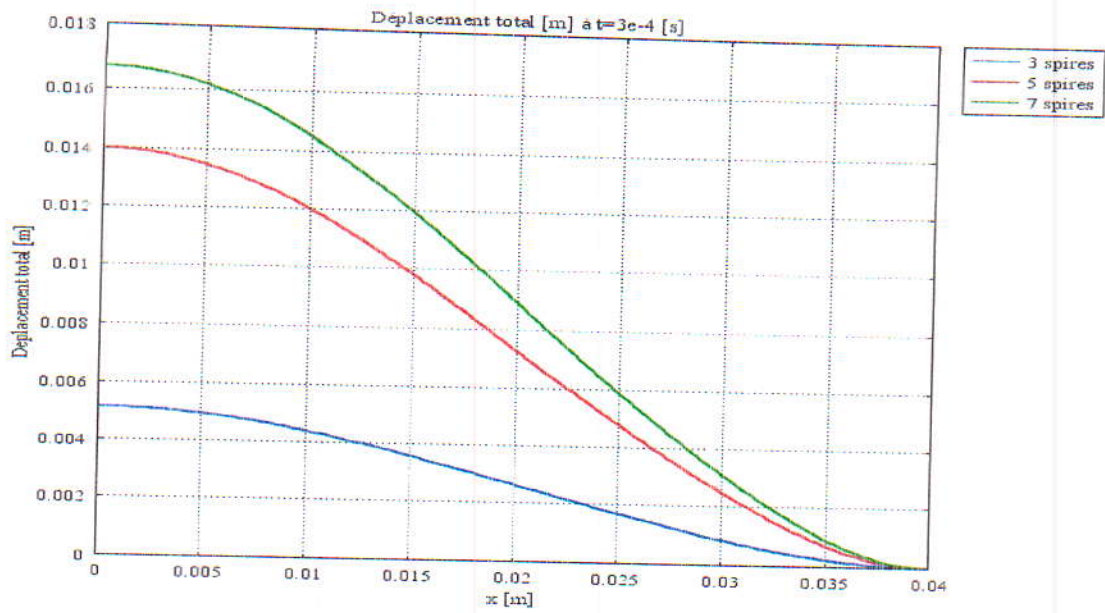


Figure III.7 : Déformation de la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]

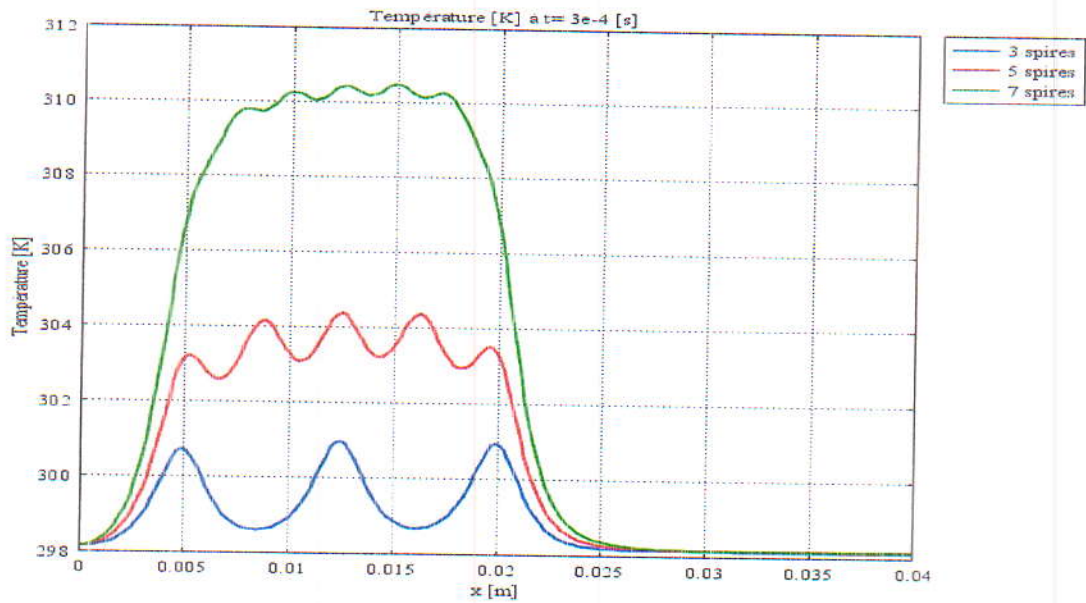


Figure III.8 : Distribution de la température le long de la plaque suivant le nombre de spires à $t = 3e-4$ [s]

III.3. Fléchissement de la plaque

III.3.1. Installation de fléchissement

Une fois le modèle numérique a été validé, nous avons procédé à la simulation d'un autre procédé de formage magnétique, cette fois ci particulièrement industriel dans la carrosserie d'automobiles en commençant d'abord par le fléchissement de plaques.

Le système considéré (Figure III. 9) se base sur l'installation d'emboutissage précédente mais en modifiant la forme et les dimensions de la bobine à trois spires, pour pouvoir fléchir le disque en son extrémité. La largeur de fléchissement (largeur de pli) utilisée est de 11.5mm en fixant la partie centrale du disque par un autre disque rigide.

III.3.2. Comportement de la plaque sous fléchissement

En utilisant une énergie 1.5 fois plus importante que celle utilisée dans le procédé d'emboutissage, le fléchissement du bord de disque ainsi que la température à travers ce dernier sont montrés par les figures (Figures III.10-11). Nous remarquons que le fléchissement a été plus rapide que l'emboutissage ($t=142 \mu s$), d'une part à cause du courant qui est plus fort et d'autre part, la surface déformée dans ce cas est plus faible.

En outre, l'analyse de la figure III.12, montrant la température le long du disque fléchi permet de remarquer que le procédé de fléchissement est plus chaud que l'emboutissage.

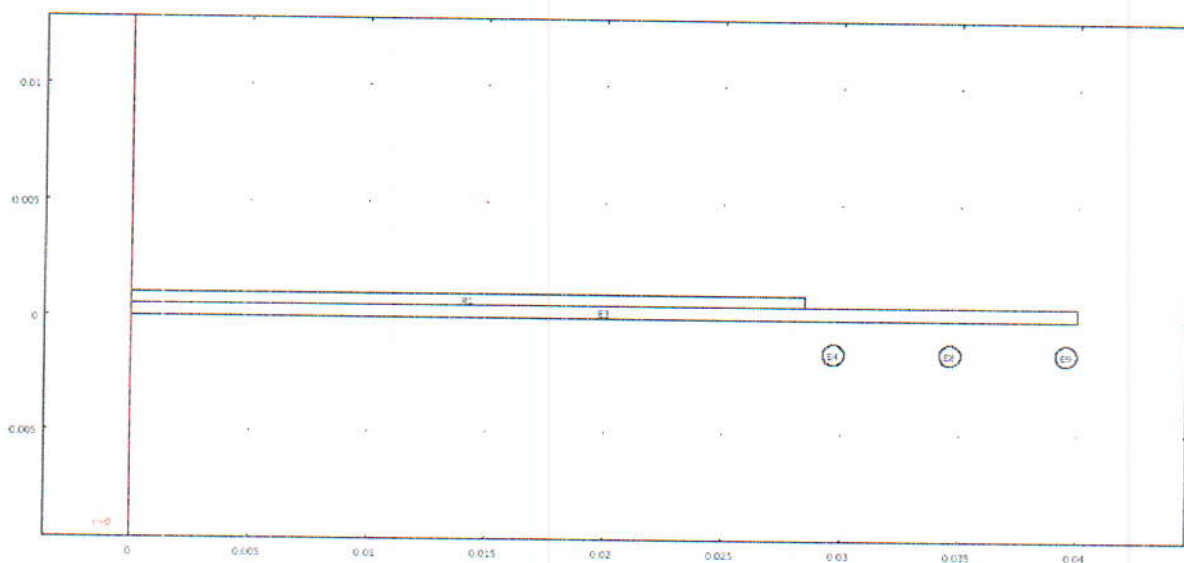


Figure III.9 : Système de fléchissement

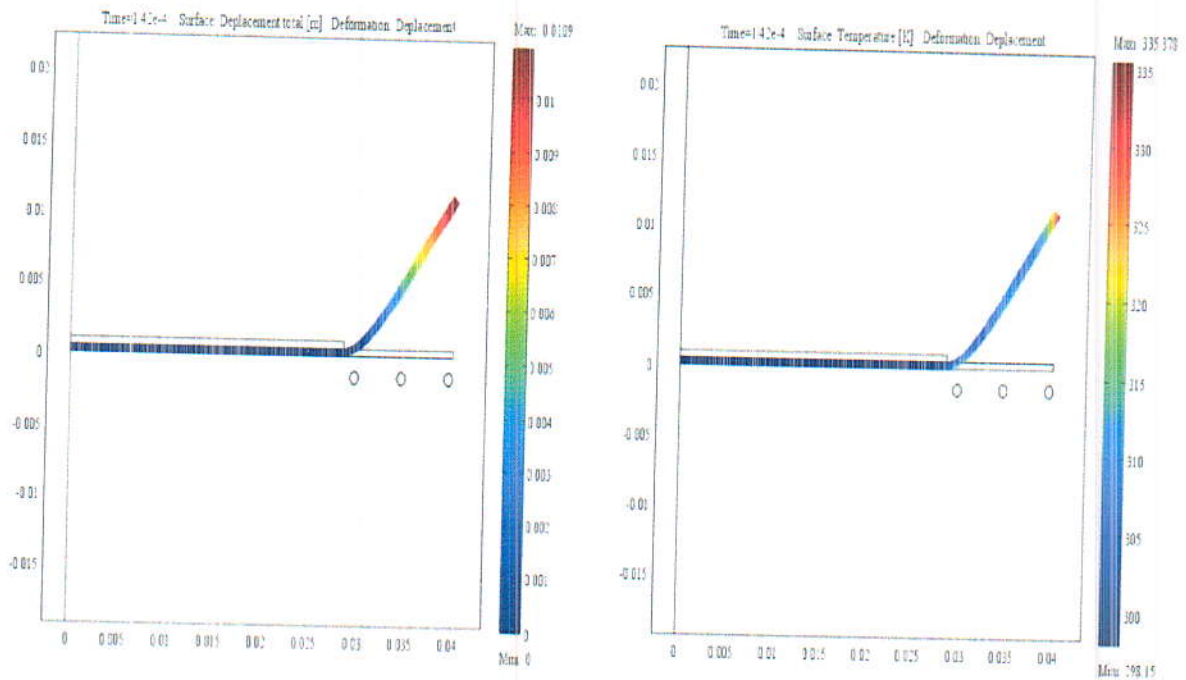


Figure III.10 : Fléchissement du disque et sa température à $t = 1.42e-4$ [s]

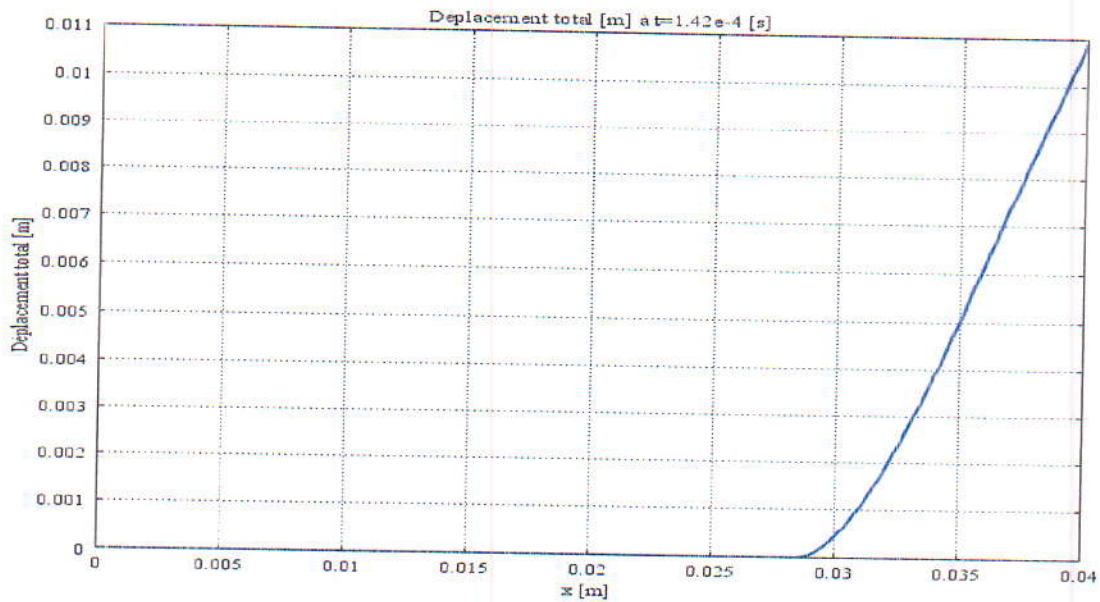


Figure III.11 : Déplacement de la plaque à $t = 1.42e-4$ [s]

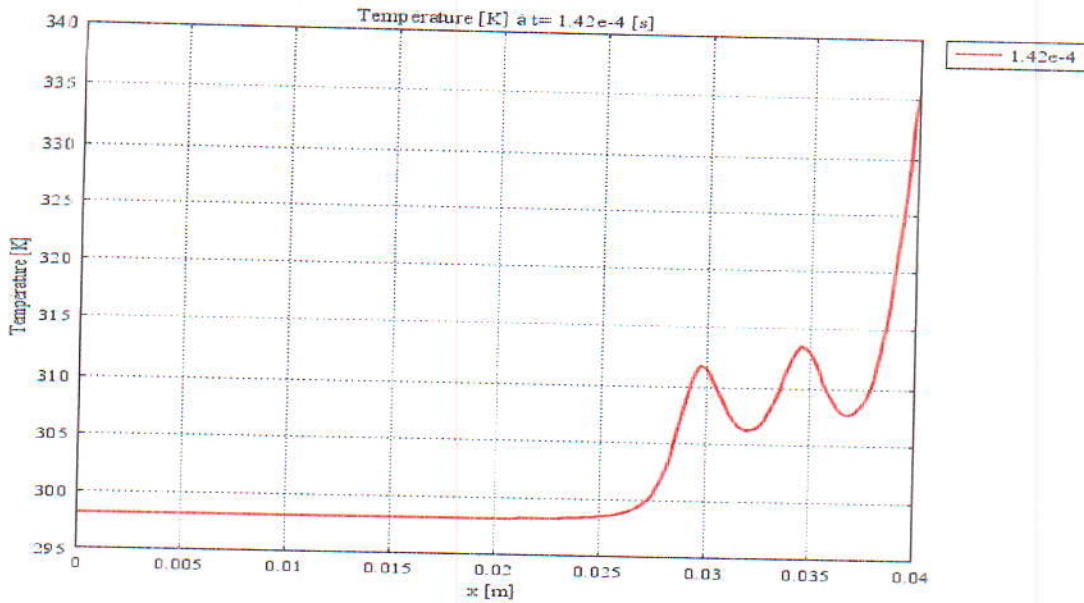


Figure III.12 : Distribution de la température à $t = 1.42e-4$ [s]

III.3.3. Etude paramétrique

Dans ce travail, une étude paramétrique a été menée pour étudier et analyser l'effet des paramètres de l'installation de fléchissement sur le comportement du disque plié.

a) Effet de l'énergie du générateur

Pour étudier l'effet de l'énergie du générateur de l'installation, nous avons considéré différents courants inducteurs, ces derniers influent directement sur le comportement magnétique, mécanique et thermique du disque fléchi. Pour une durée comparable, le fléchissement ($d_{max}=0.8\text{mm} - 2.6\text{mm} - 24.2\text{mm} - 40.6\text{mm}$) et l'échauffement du bord du disque ($T^{\circ}max=305\text{K} - 310\text{K} - 370\text{K} - 425\text{K}$) sont d'autant plus importants que l'énergie appliquée est importante ($E=210\text{J} - 840\text{J} - 3.26\text{KJ} - 5.25\text{KJ}$) (Figures III.13-14). Cependant, nous ne pouvons pas augmenter indéfiniment l'énergie du générateur puisqu'elle est limitée par la limite de rupture du matériau.

b) Effet du nombre de spires

En considérant différentes bobines de fléchissement à différents nombre de spires, nous pouvons conclure que ce paramètre possède un effet notable mais plus faible que celui de la puissance du générateur (Figure III.15-16).

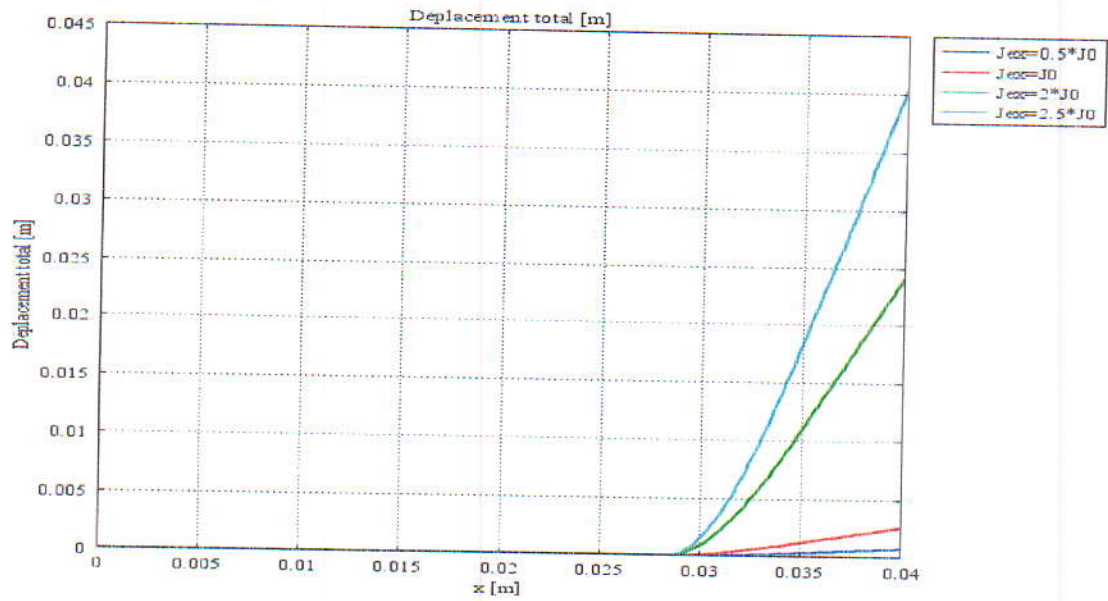


Figure III.13 : Déplacement de la plaque avec différentes énergies au temps max

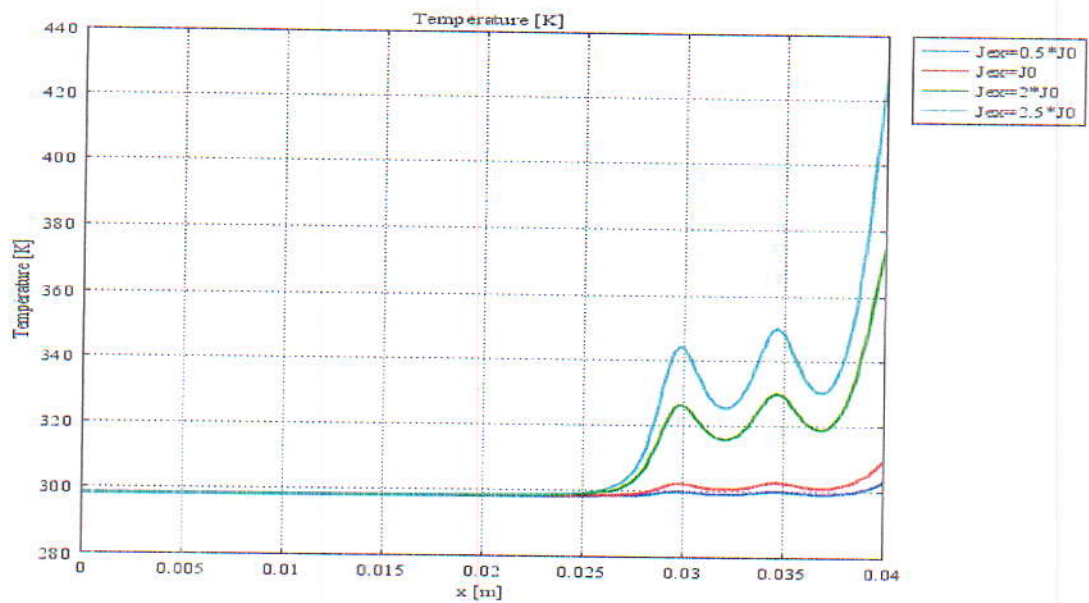


Figure III.14 : Distribution de la température avec différentes énergies

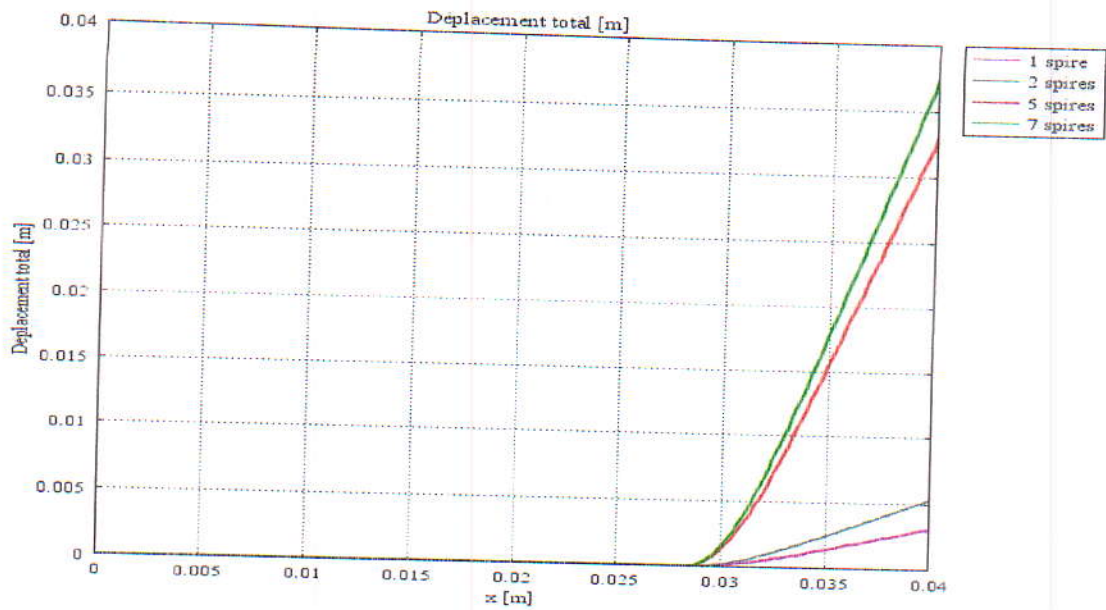


Figure III.15 : Déplacement maximal de la plaque suivant le nombre de spires

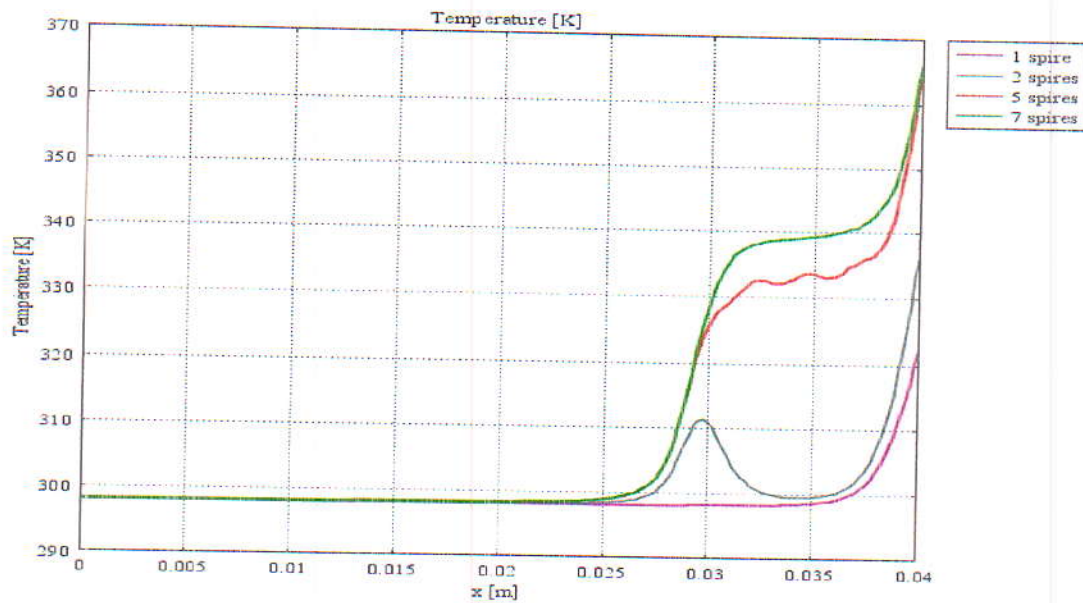


Figure III.16 : Distribution de la température suivant le nombre de spires

c) Effet de la largeur du pli

Avec une bobine à 3 spires et un générateur à 1.26KJ, nous avons essayé de simuler le fléchissement du bord d'un disque avec différentes largeurs.

La déformation est plus accentuée en augmentant la largeur du pli, où les forces sont aussi plus importantes, cependant les répartitions de la température ne présentent pas de grandes différences (Figure III.17-18).

D'autre part, le temps maximal de fléchissement est faiblement affecté surtout par le nombre de spires de la bobine.

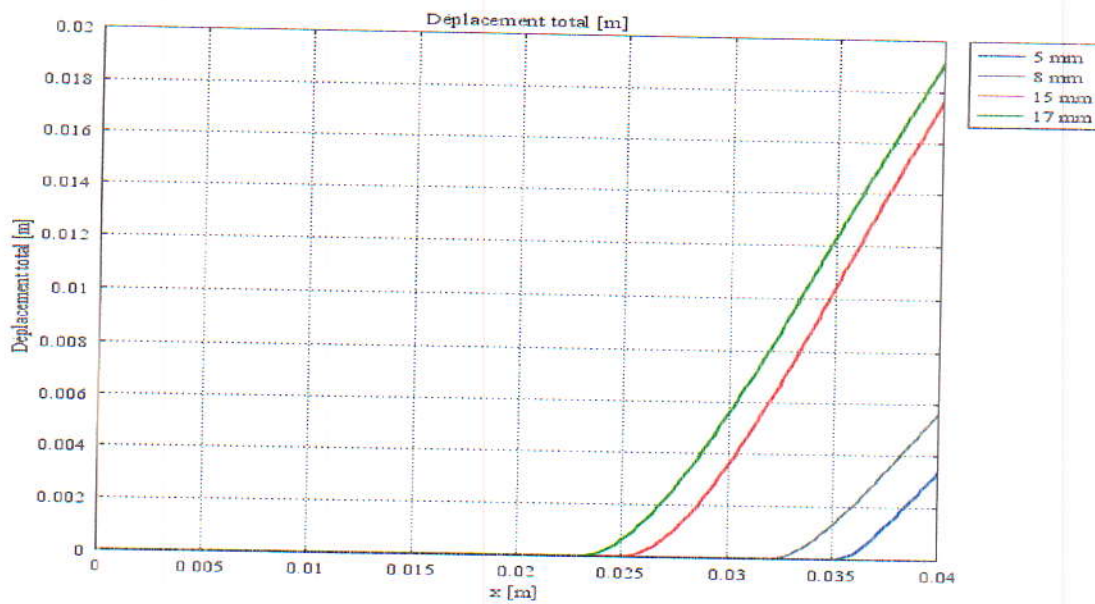


Figure III.17 : Déplacement de la plaque suivant la largeur du pli

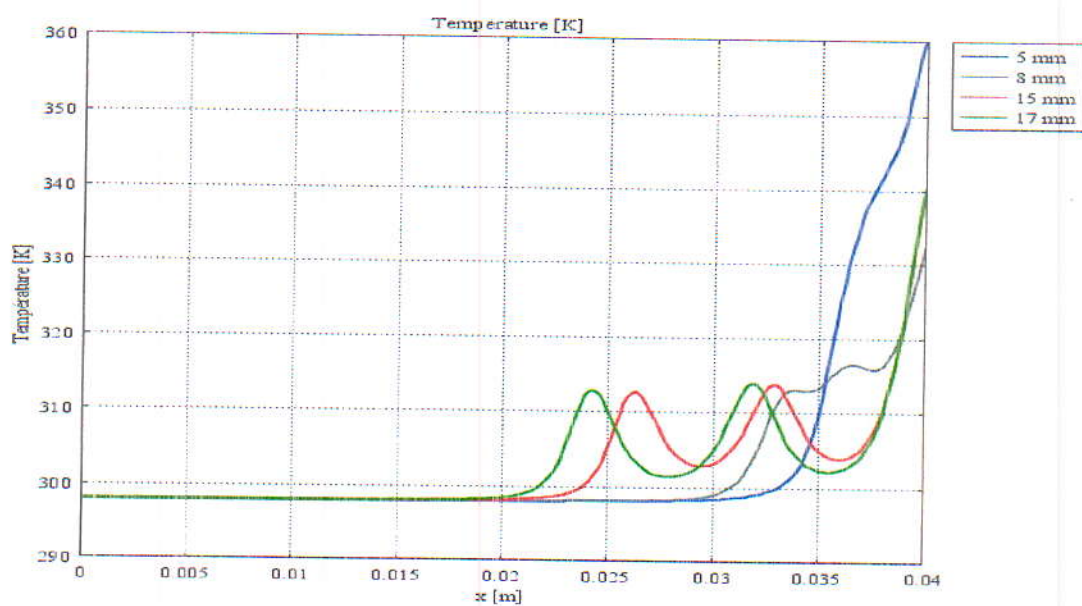


Figure III.18 : Distribution de la température suivant la largeur du pli

III.4. Flambage de disque (Flanging)

III.4.1. Installation de flambage

Afin d'aboutir au pliage de tôles, procédé très utilisé dans l'industrie d'automobiles, nous avons continué sur le système précédent en modifiant l'inducteur spiral plat précédent par une bobine tubulaire à 4 spires, entourant le disque et située en face de la partie fléchie, de largeur 11.5mm (Figure III.19).

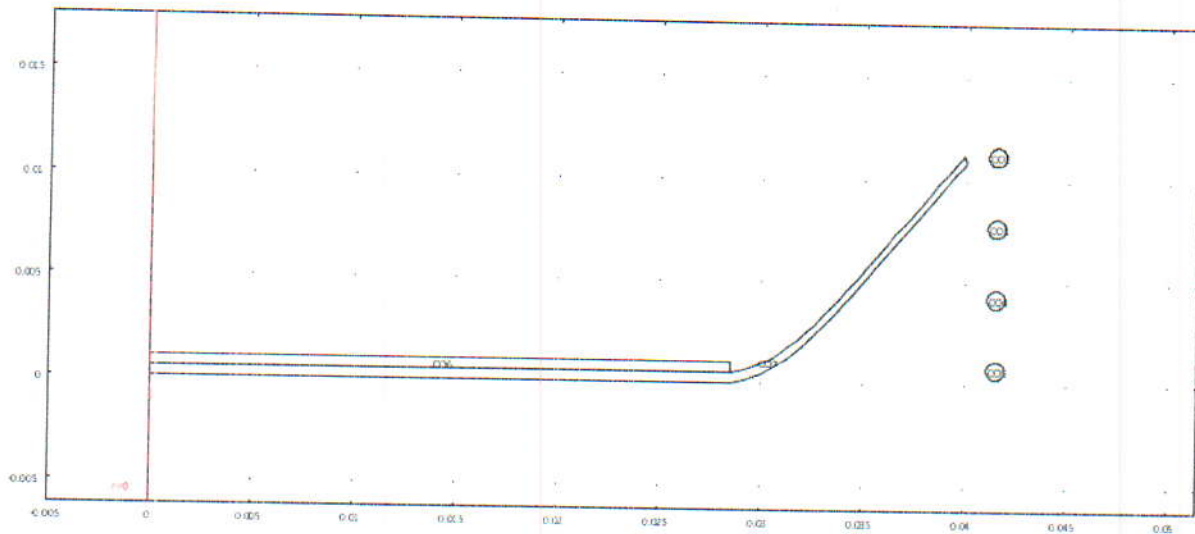


Figure III.19 : Géométrie du système de flambage

III.4.2. Flambage droit (Bending) (pliage à 90°)

La première étape du processus de l'ourlage (hemming) dans les applications industrielles est le flambage ou le pliage à un angle droit (Bending), ou la pièce est pliée formant un angle droit.

Pour ce modèle nous avons utilisé deux modèles différents pour le comportement mécanique du disque : le modèle élastoplastique et le modèle isotrope (Chapitre 2).

D'après les résultats obtenus dans les deux cas élastoplastique (Figures III.20-21) et isotrope (Figures III.22-23) permettent de faire les remarques suivantes :

- Durant des durées de pliage comparables ($t=43\mu\text{s}$ – $t=30\mu\text{s}$), un flambage droit d'environ 5mm est obtenu dans les deux cas, mais avec différentes énergies de décharge (5.25 KJ et 11.81KJ) et donc le cas isotrope nécessite plus d'énergie pour le pliage des pièces. Cela confirme le fait que le modèle élastoplastique est celui qui simule mieux la déformation mécanique dans ce processus et reflète bien la réalité expérimentale de ces installations.

- D'autre part, les températures des pièces pliées sont plus importantes dans ce procédé de flambage qui semble être plus chaud que l'emboutissage et le fléchissement.

- Cependant, les déformations obtenues numériquement ne montrent pas un vrai angle droit (rayon de courbure de 7mm). Cela est dû au modèle numérique axisymétrique qui ne permet pas de prendre en compte des formes complexes de l'inducteur.

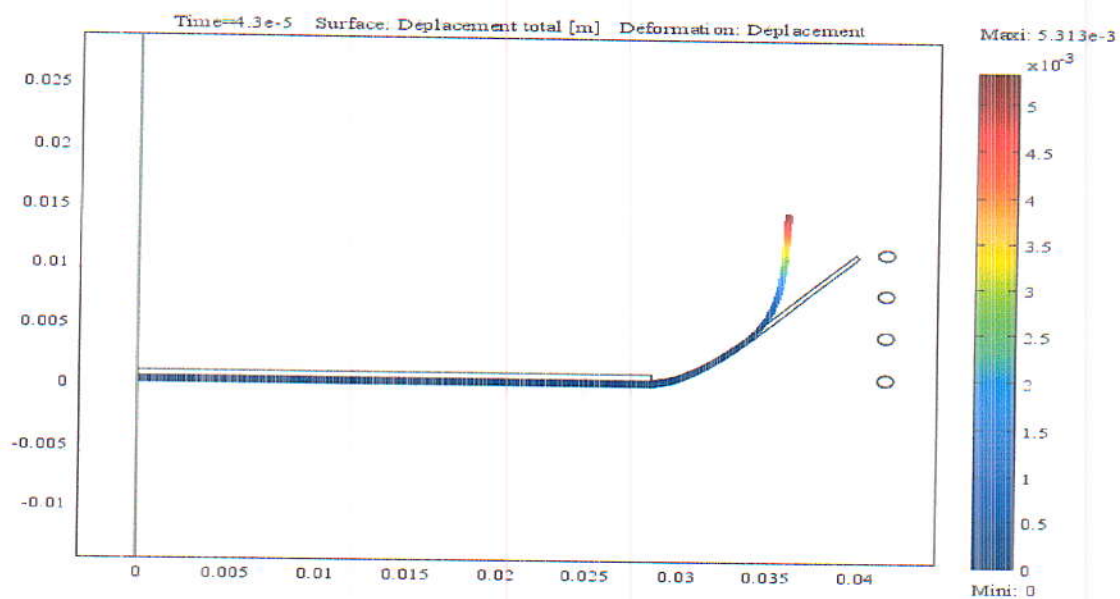


Figure III.20 : Déplacement de la plaque à $t = 4.3 \times 10^{-5}$ [s] (Cas élastoplastique $J_{ex} = 2.5 \times J_0$)

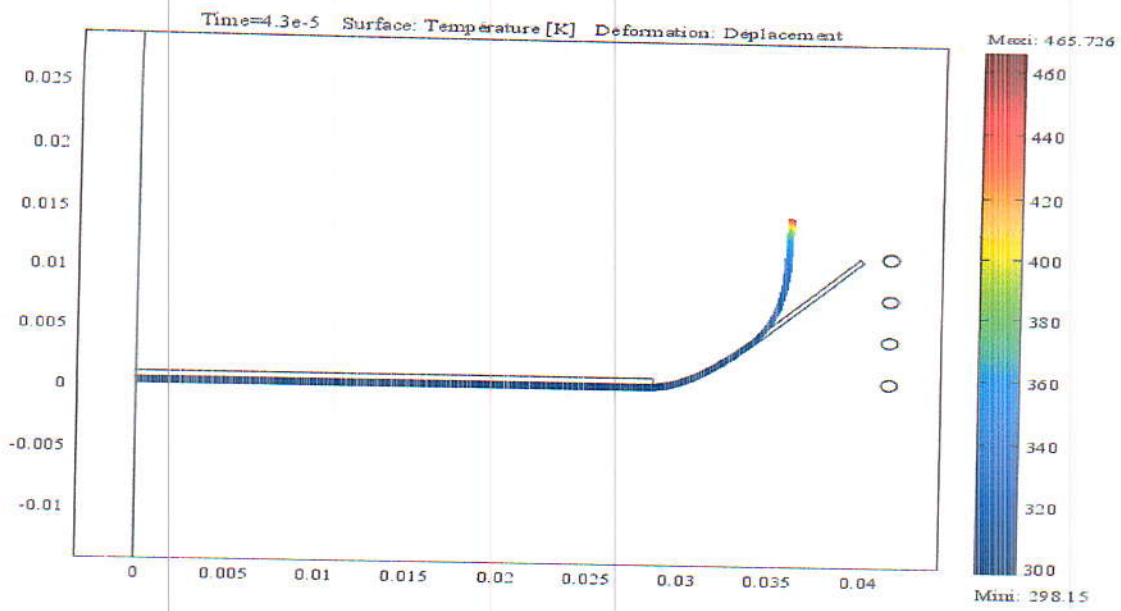


Figure III.21 : Distribution de la température à $t = 4.3e-5$ [s] (Cas élastoplastique $J_{ex}=2.5xJ_0$)

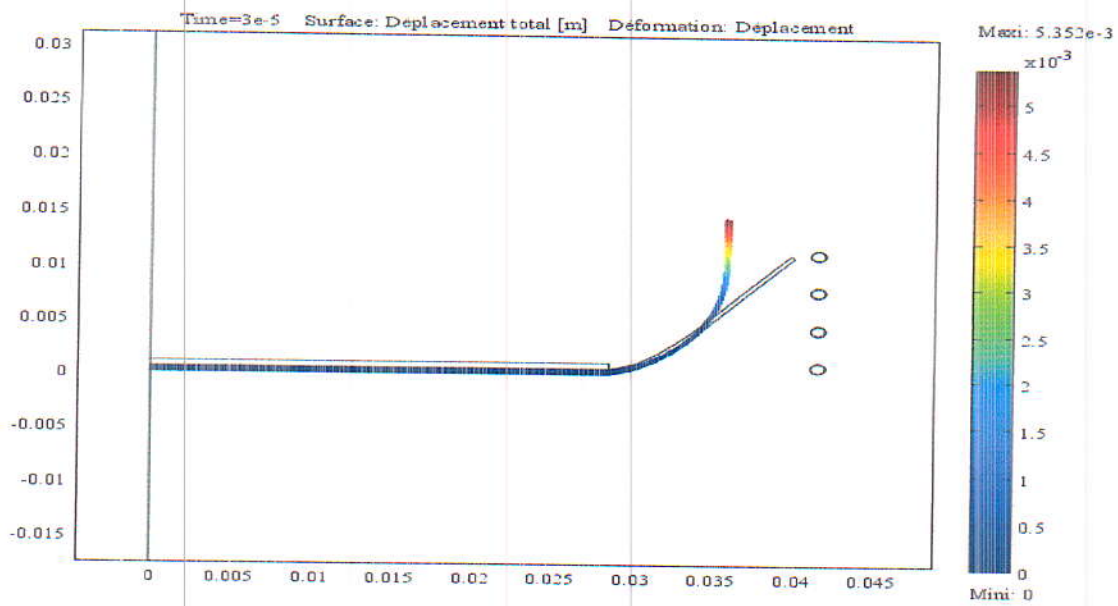


Figure III.22 : Déplacement de la plaque à $t = 3e-5$ [s] (Cas isotrope $J_{ex}=3.75xJ_0$)

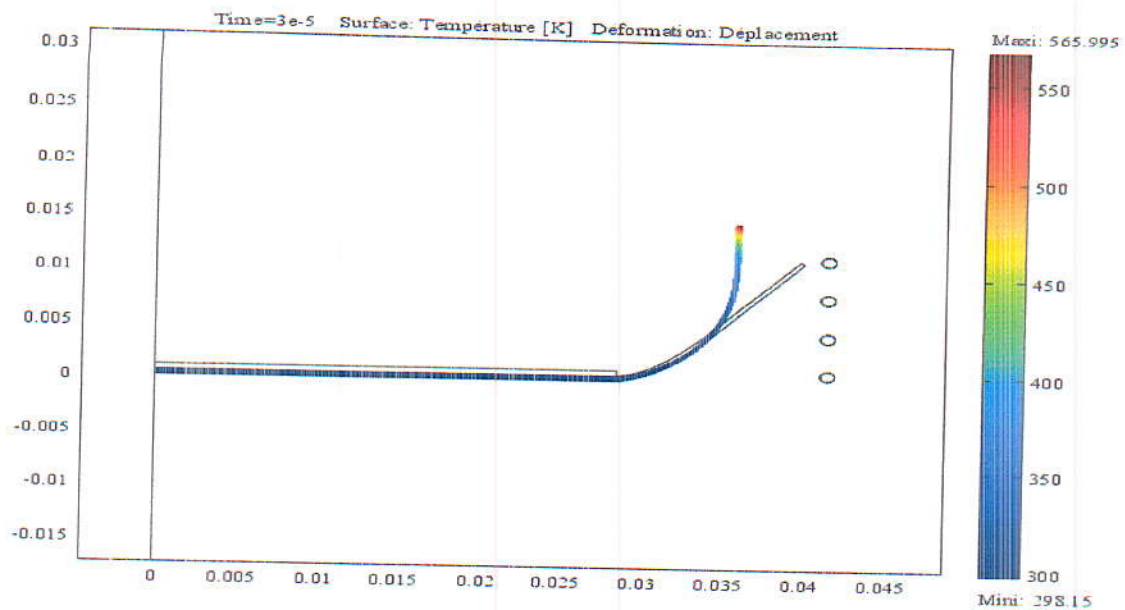


Figure III.23 : Distribution de la température à $t = 3e-5$ [s] (Cas isotrope $J_{ex}=3.75xJ_0$)

III.4.3. Flambage concave (Concave Bending)

Certaines pièces d'automobiles formées par pliage électromagnétique ont une forme concave ou convexe. Dans d'autres modèles, nous avons essayé de retrouver ces formes spécifiques de flambage. Pour cela le système considéré est celui donné par la figure III.24, où la bobine tubulaire à 4 spires, est centrée en face à l'extérieur de la pièce pliée d'un angle droit, avec un générateur de 2.57 KJ.

La forme obtenue (Figure III.25) est un embossement de la partie verticale qui devient concave. Cette forme concave est d'autant plus accentuée que le nombre de spires de la bobine est grand et que l'énergie du générateur est importante (Figures III.26-27).

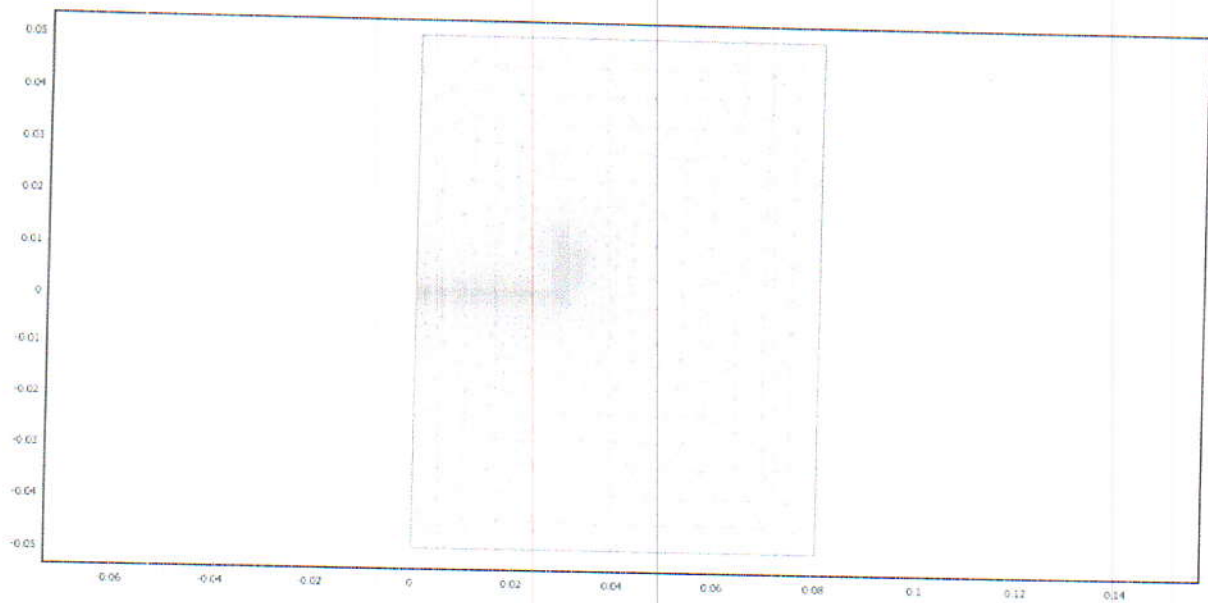


Figure III.24 : Maillage du système de flambage concave

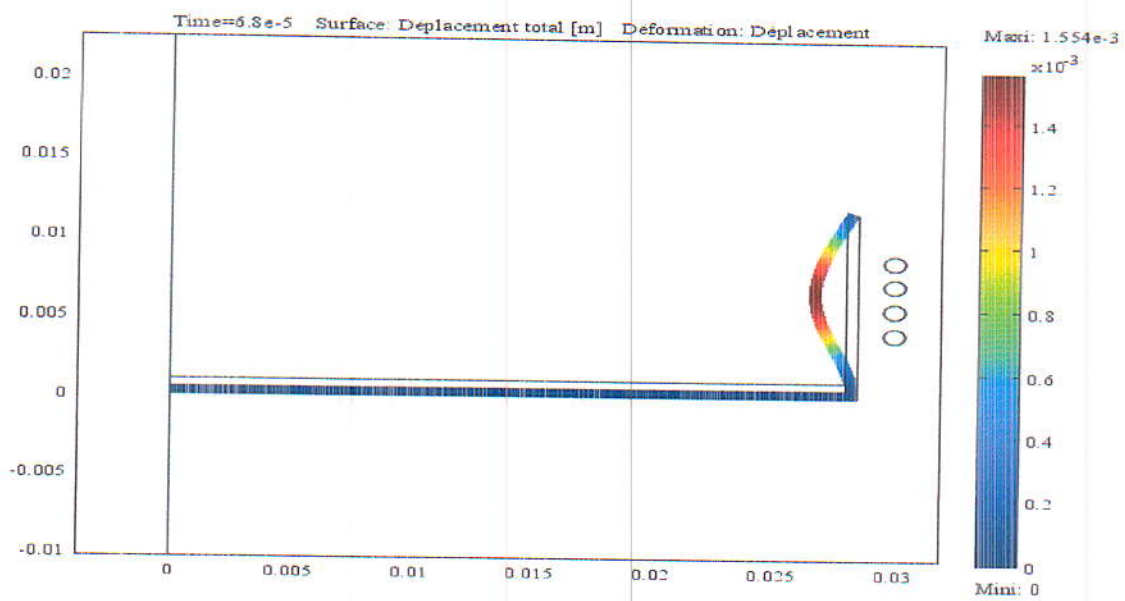


Figure III.25 : Flambage concave à $t = 6.8e-5$ [s]

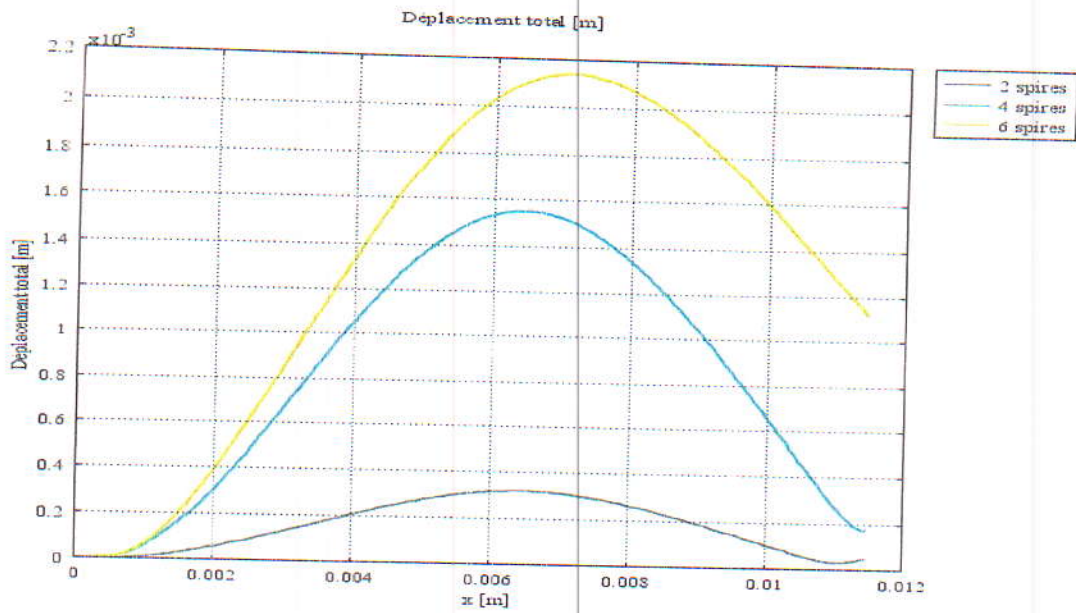


Figure III.26 : Formes concaves suivant le nombre de spires

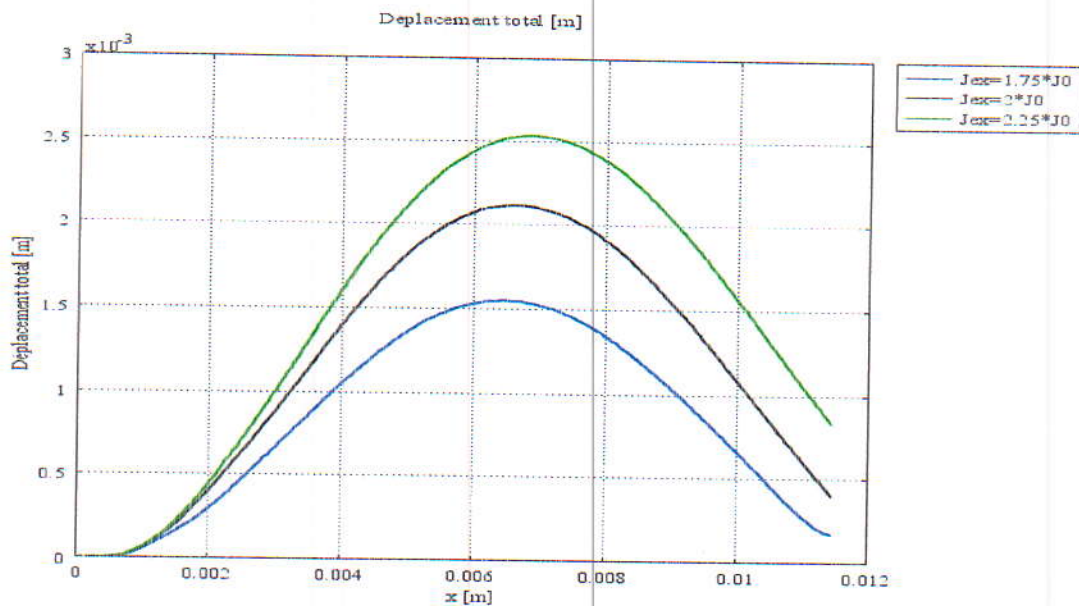


Figure III.27 : Formes concaves avec différentes énergies

III.4.4. Flambage convexe (Convexe Bending)

En plaçant la bobine à 4 spires à l'intérieur de la pièce en L (Figure III.28). La partie verticale est déformée donnant une forme convexe, exactement symétrique à la forme concave précédente (Figure III.29). Les formes convexes sont aussi accentuées en augmentant l'énergie du générateur de formage et le nombre de spires de l'inducteur (Figure III.30-31).

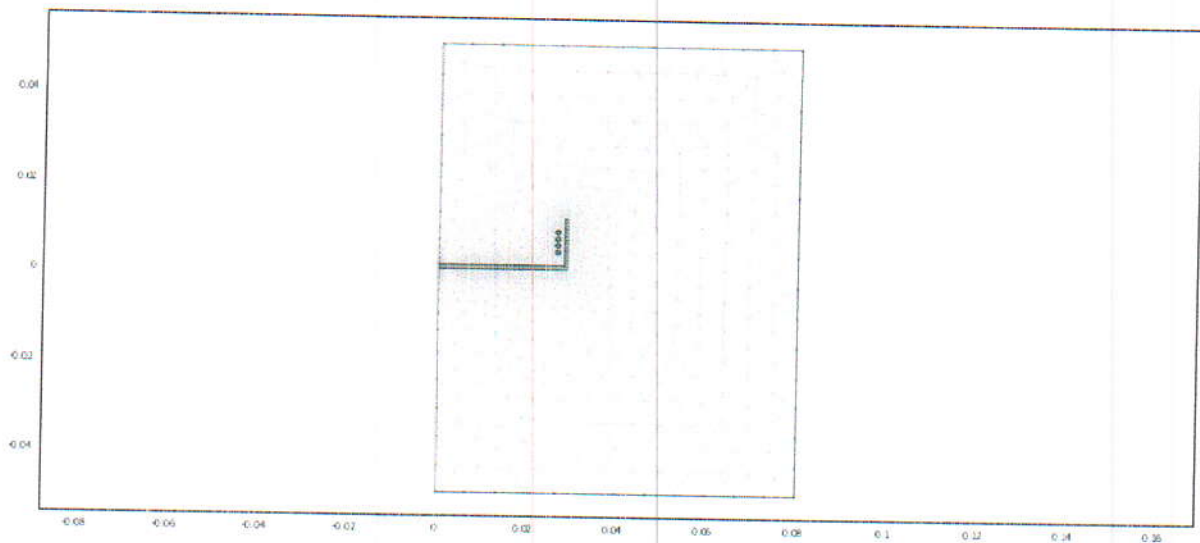


Figure III.28 : Maillage du système de flambage convexe

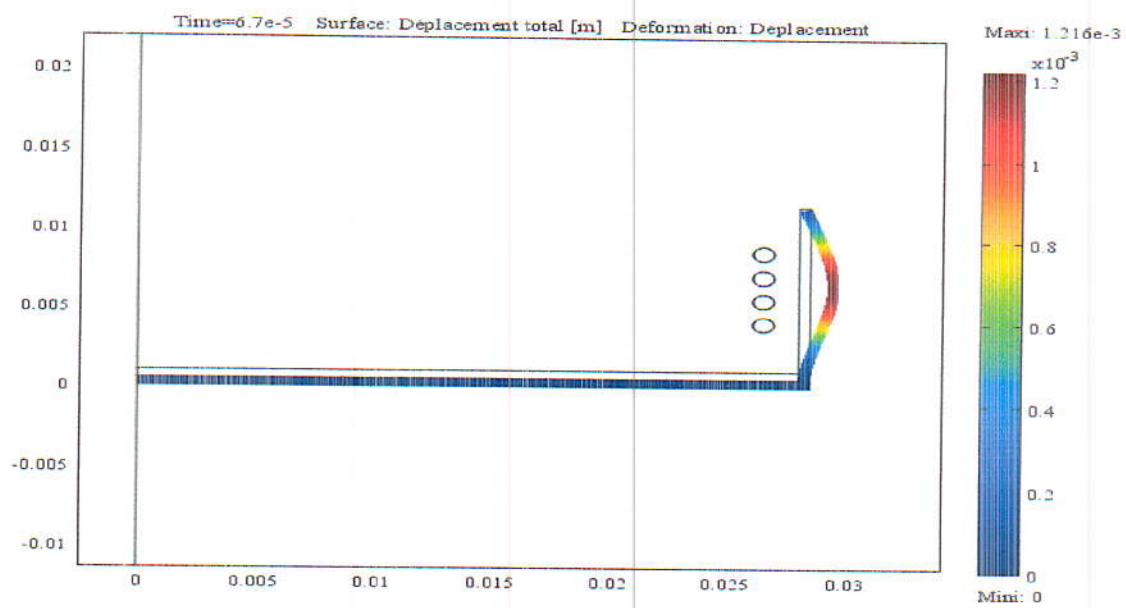


Figure III.29 : Flambage convexe à $t = 6.7e-5$ [s]

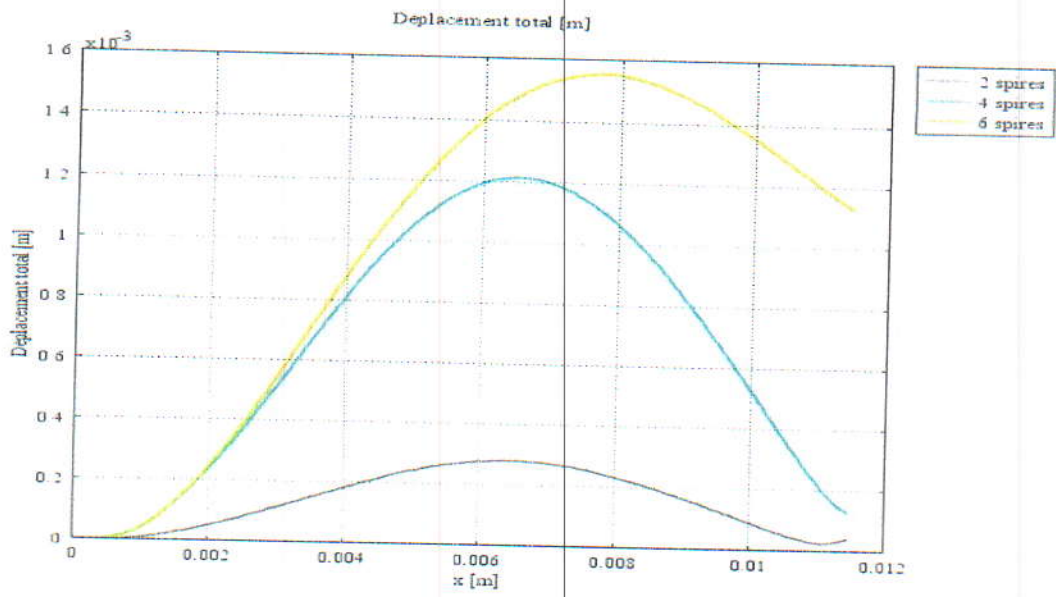


Figure III.30 : Flambage convexe suivant le nombre de spires

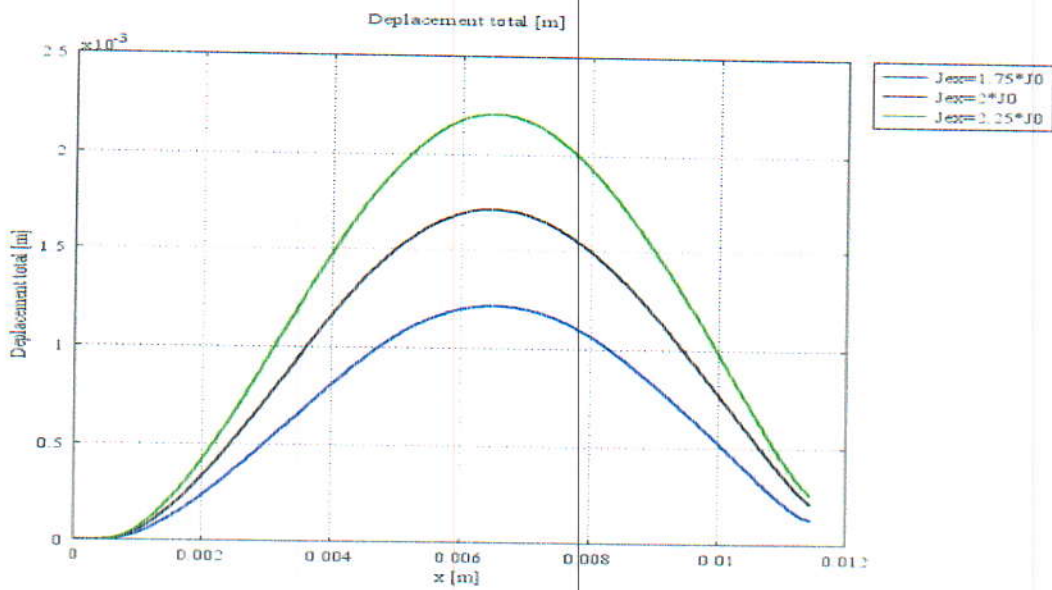


Figure III.31 : Formes convexes avec différentes énergies

III.5. Pliage (Ourlage) (Hemming)

III.5.1. Pré-pliage (Prehemming)

La deuxième application du pliage de tôles de voitures et le pré-pliage (prehemming). Celui-ci est utilisé lorsque la pièce est pliée en un angle inférieur ou égale à 135° , sans se plier sur elle-même ou sur une autre tôle. Le système considéré (Figure III.32), utilise une bobine à 5 spires, placée en face du bord supérieur de la pièce pliée avec un angle droit.

Les résultats obtenus dans ce cas (Figure III.33), avec une énergie de 3.36KJ montre un pliage de la pièce avec un angle d'environ 135° . La température de la pièce est accentuée au niveau de la pointe, où le déplacement est maximal.

Une étude sur la nature du matériau de la pièce et ses caractéristiques a été menée, afin d'analyser les différences de comportement entre les différents matériaux ayant différents caractéristiques (Tableau III.2).

Les résultats obtenus (Figures III.34–35–36-37 et 38) montrent que l'Aluminium est le matériau qui montre le meilleur comportement mécanique, ce qui justifie son utilisation de plus en plus répandue dans l'industrie d'automobiles [15] [30].

Cependant, le Magnésium qui devient de plus en plus utilisé, ne montre pas un comportement mécanique meilleur. Notre analyse numérique nous a permis de remarquer que le Magnésium demande un peu plus d'énergie que l'Aluminium et ses alliages.

Il est surtout privilégié à cause de son faible poids, ce qui est demandé pour les voitures économiques.

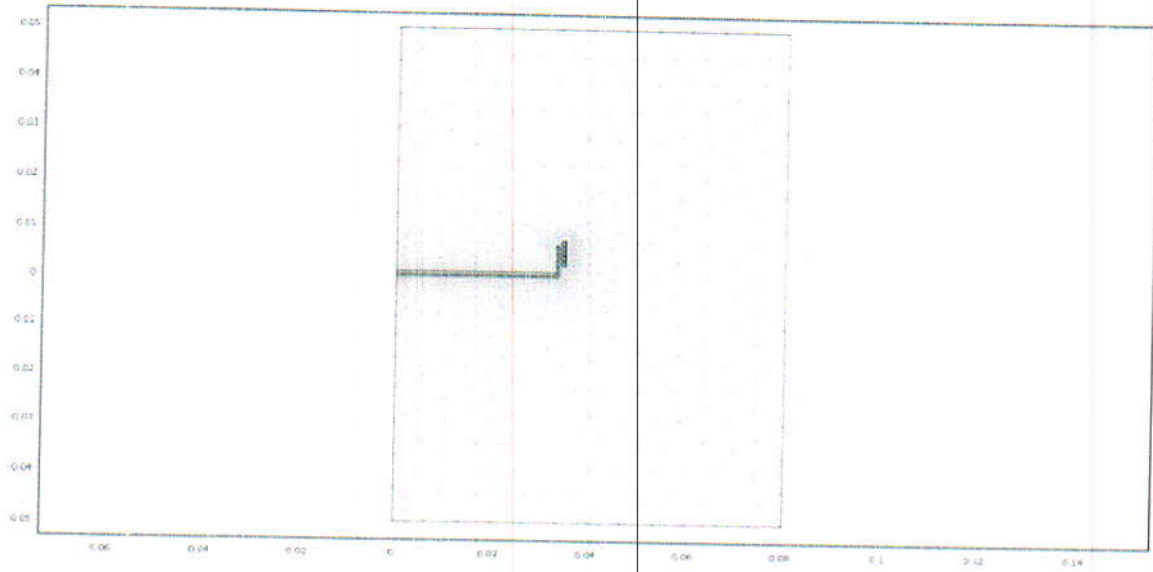


Figure III.32 : Maillage du système de pliage

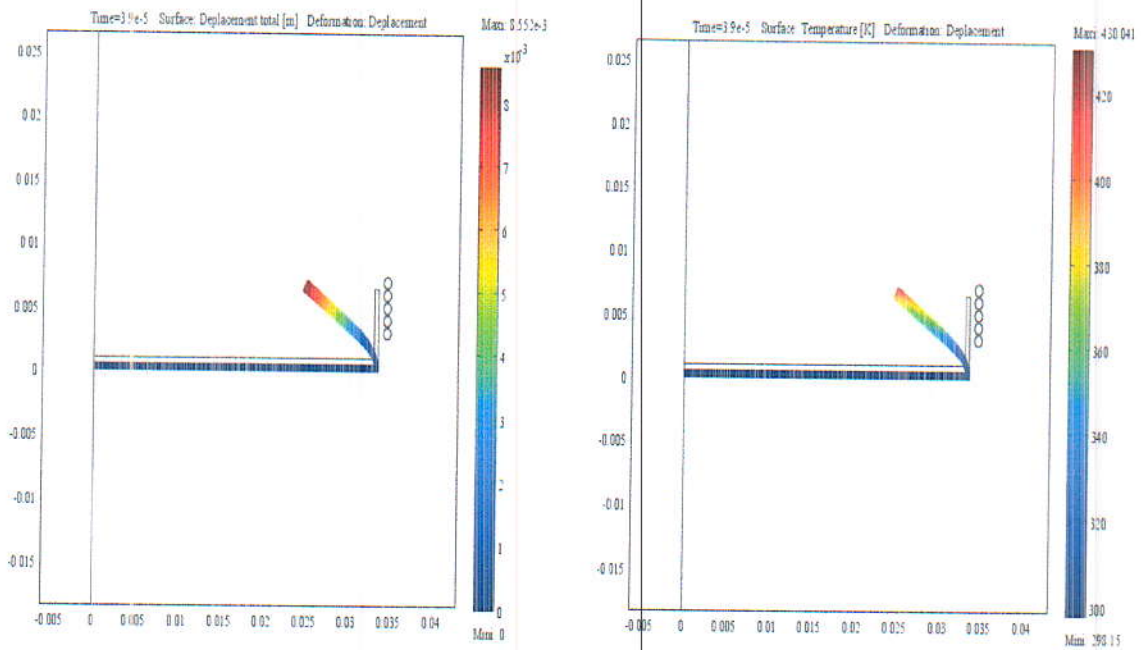


Figure III.33 : Pré pliage à $t = 3.9e-5$ [s]

	Conductivité thermique [W/m*K]	Conductivité électrique [S/m]	Module de Young [Pa]	Densité [Kg/m ³]	Coefficient de Poisson
Aluminium	160	3.774e7	70e9	2700	0.33
Aluminium 1050	368	3.448e7	69e9	2705	0.33
Magnésium AZ31B	96	1.087e7	45e9	1770	0.35

Tableau III.2 : Caractéristiques des matériaux considérés [25] [31] [32]

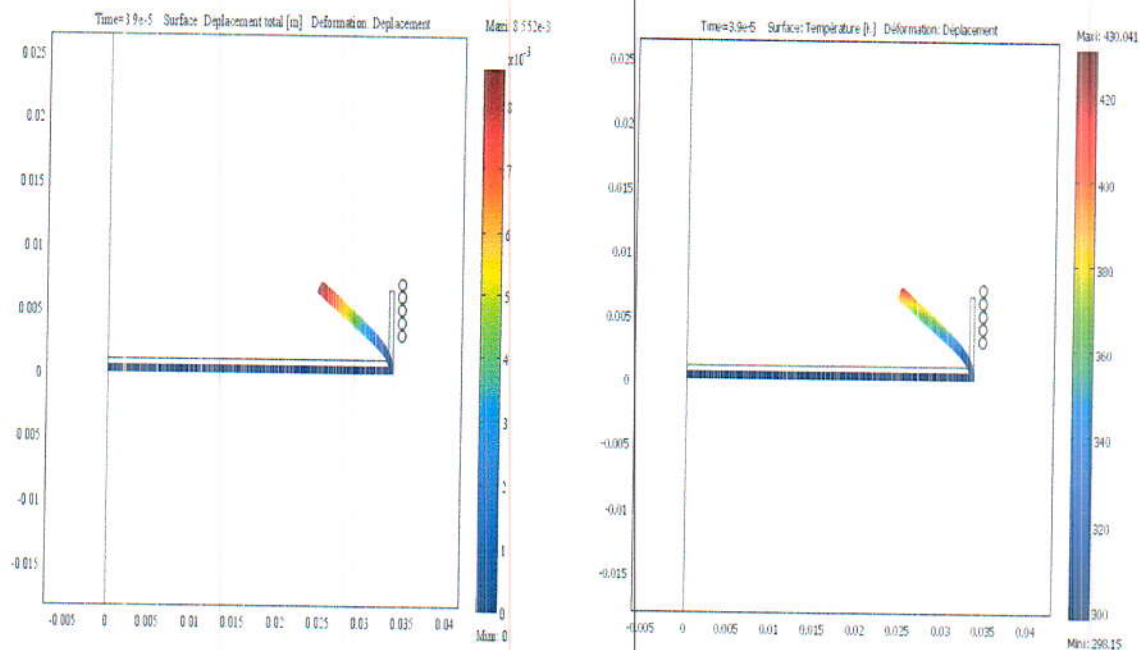


Figure III.34 : Pliage de la pièce en Aluminium

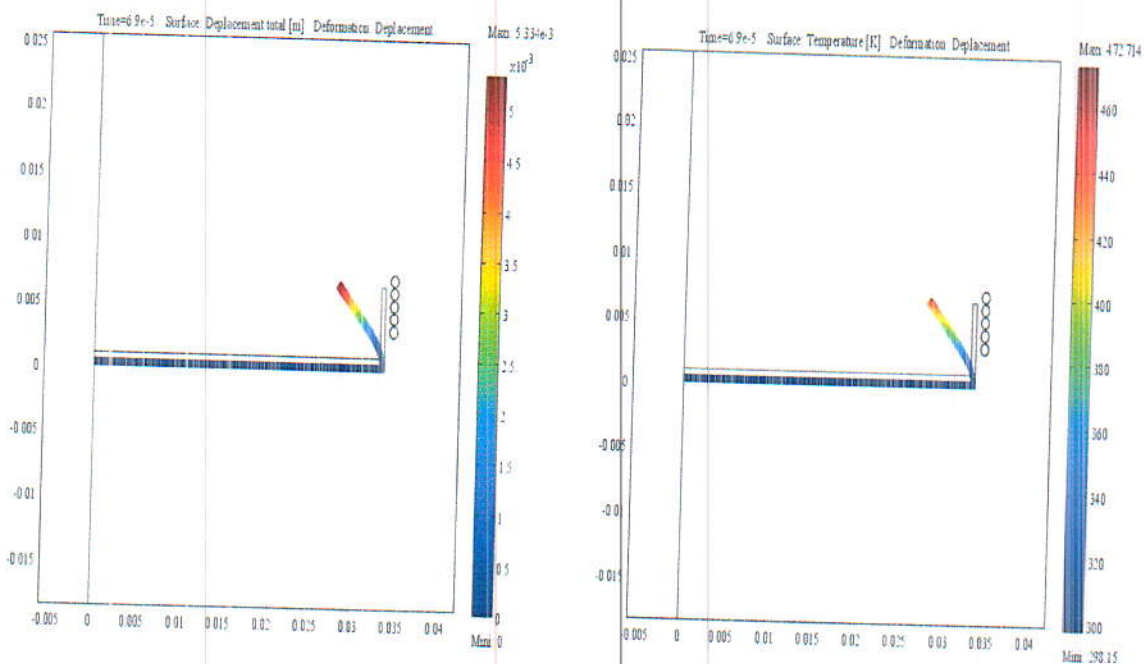


Figure III.35 : Pliage de la pièce en alliage d'Aluminium AL 1050

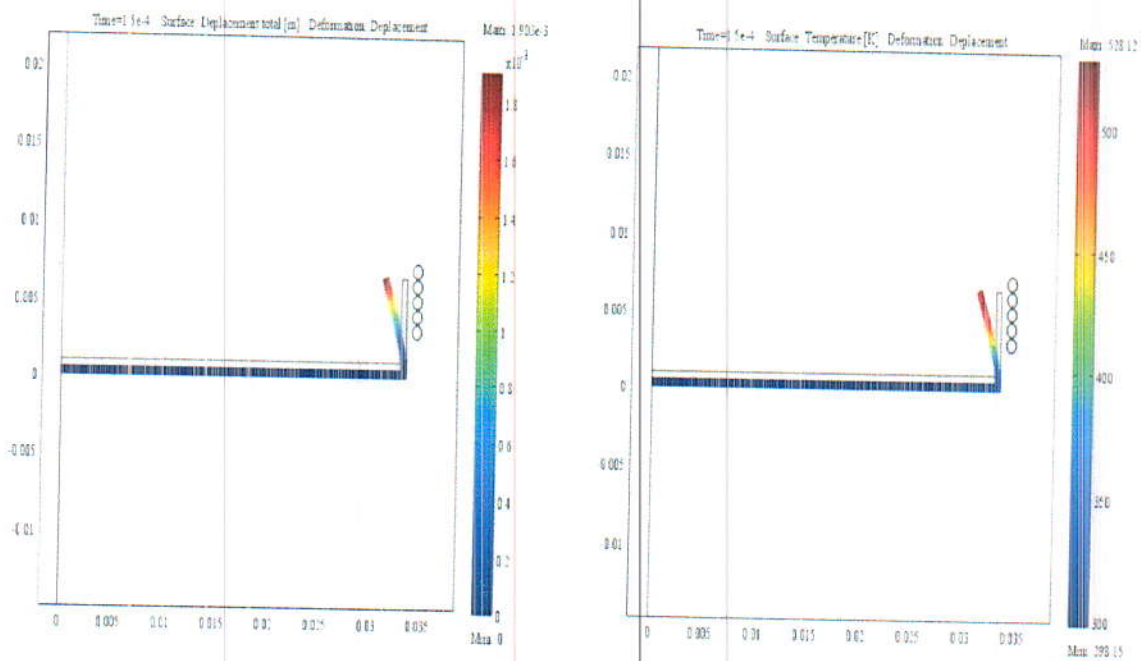


Figure III.36 : Pliage de la pièce en Magnésium

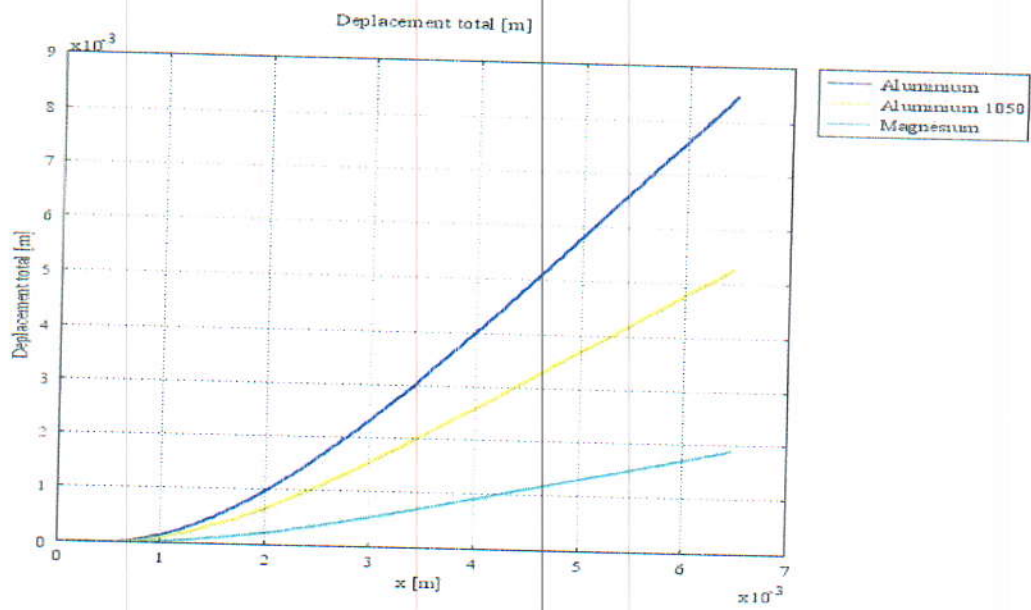


Figure III.37 : Déplacement suivant le type du matériau

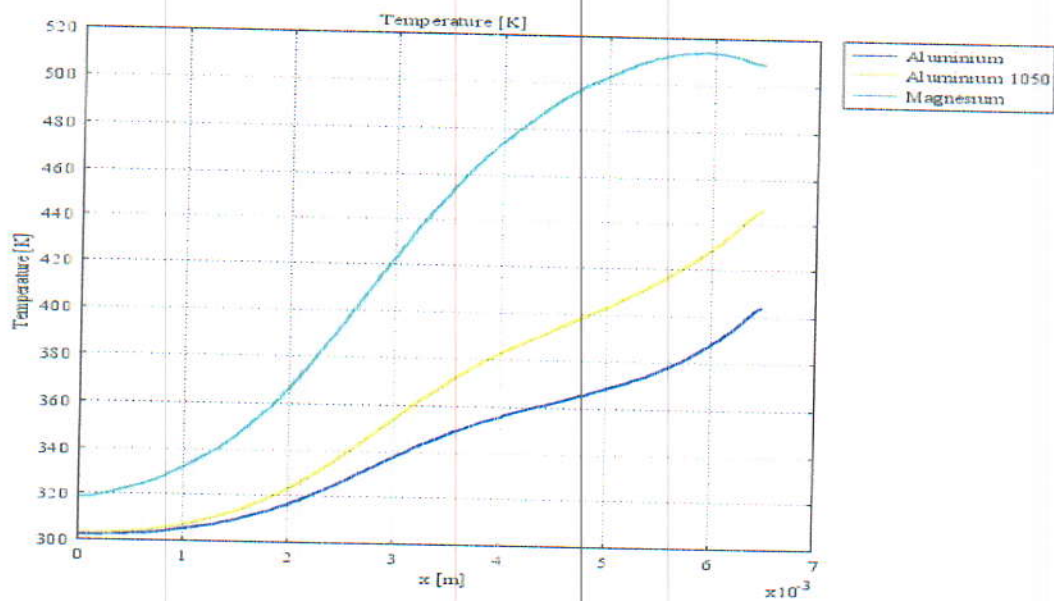


Figure III.38 : Distribution de la température suivant le type du matériau

III.5.2. Ourlage (Hemming)

a) 1^{ère} étape

Afin d'obtenir un pliage avec un angle supérieur à 180° (Hemming), ce dernier est procédé en deux étapes.

D'abord, la pièce est déformée avec l'inducteur tubulaire à 5 spires, ensuite une deuxième étape est nécessaire pour accomplir l'ourlage de la pièce sur la tôle située directement sur la pièce.

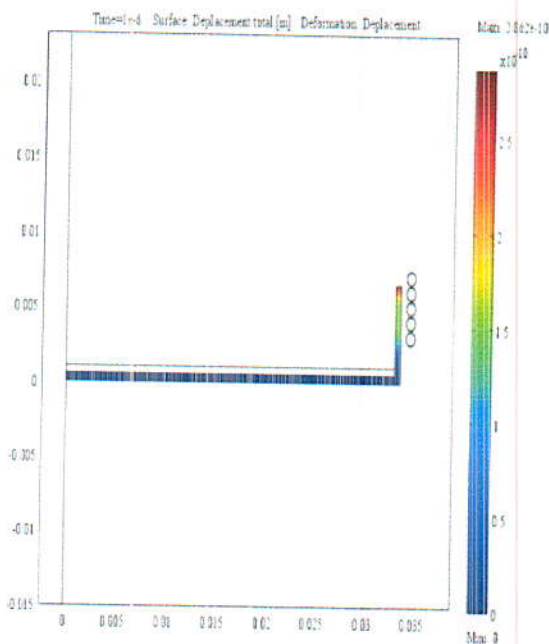
Les formes obtenues à différents instants sont montrées sur (Figure III.39), ainsi que la température le long de la pièce au temps maximal (Figure III.40).

b) 2^eme étape

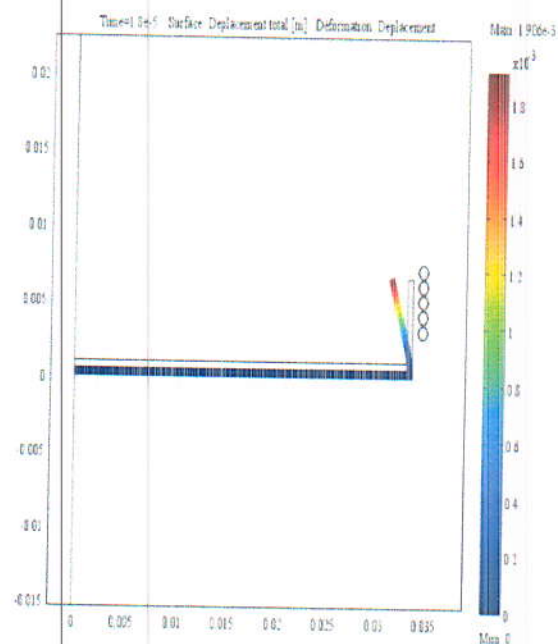
Pour terminer le pliage de la pièce, un inducteur de forme complexe a été utilisé pour cette opération. Il est formé par une bobine tubulaire à 3 spires et une autre plate, à 3 spires aussi, et qui permet un pliage plus accentué de la pièce, le générateur utilisé pour la décharge dans cette étape doit doubler la puissance.

Les formes obtenues numériquement durant la durée de pliage électromagnétique (Figure III.41) sont validées expérimentalement [15].

La répartition de la température (Figure III.42) montre que, malgré un échauffement important est remarqué mais il est supportable par le matériau et inférieur à la limite de celui-ci.



$t = 1e-6$ [s]



$t = 1.8e-5$ [s]

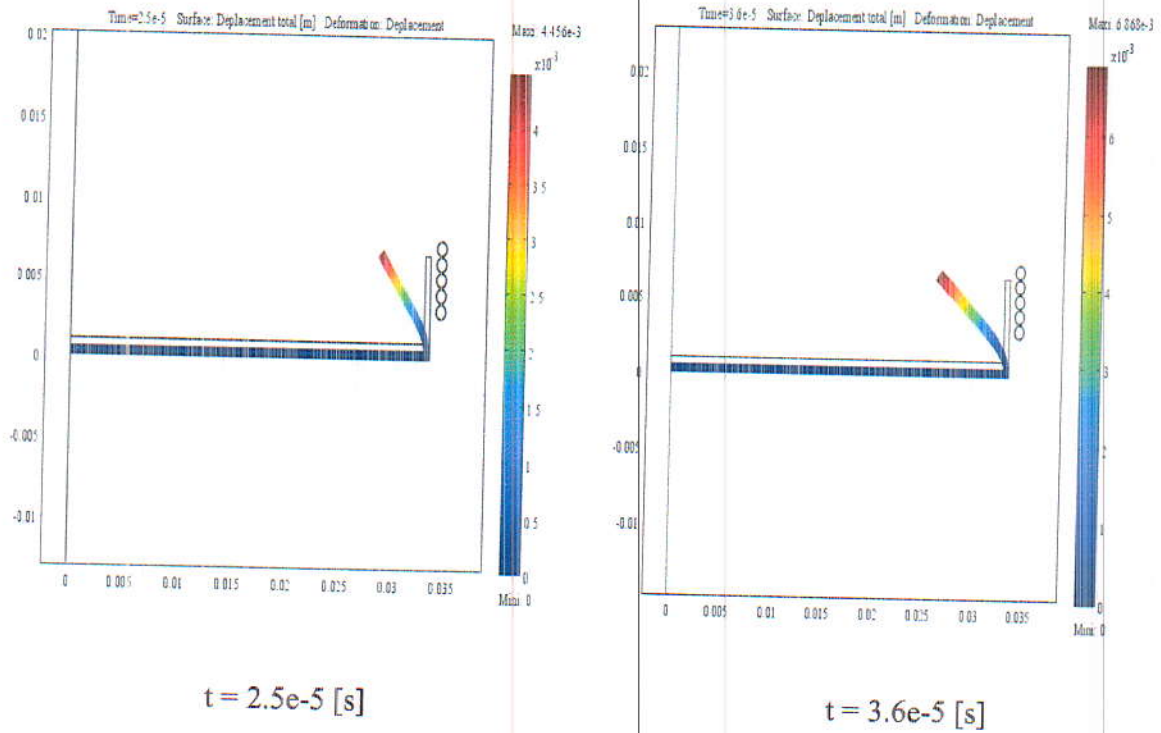


Figure III.39 : Pliage de la pièce à différents instants

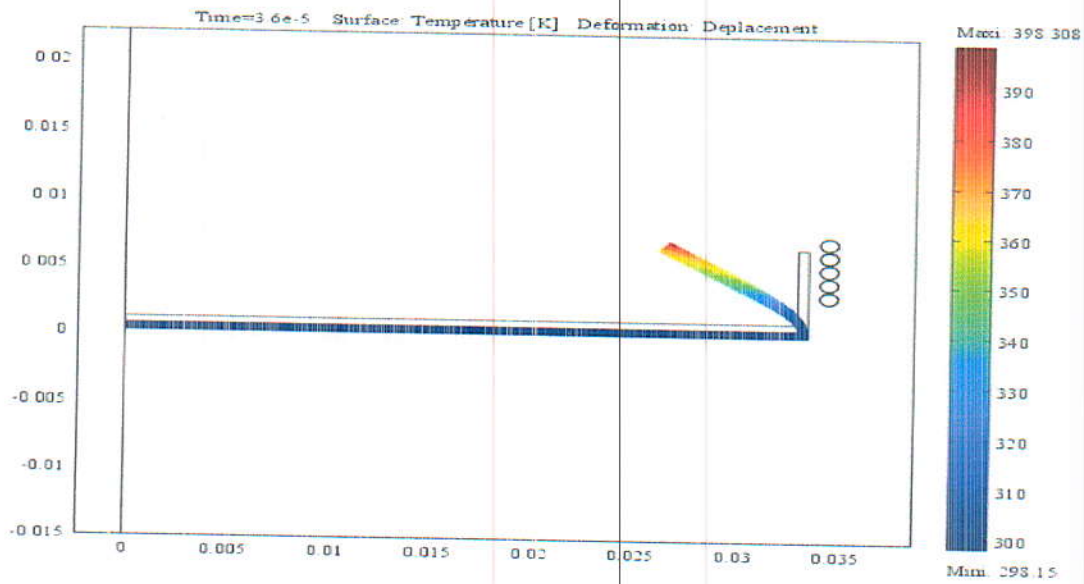


Figure III.40 : Distribution de la température à $t = 3.6e-5$ [s]

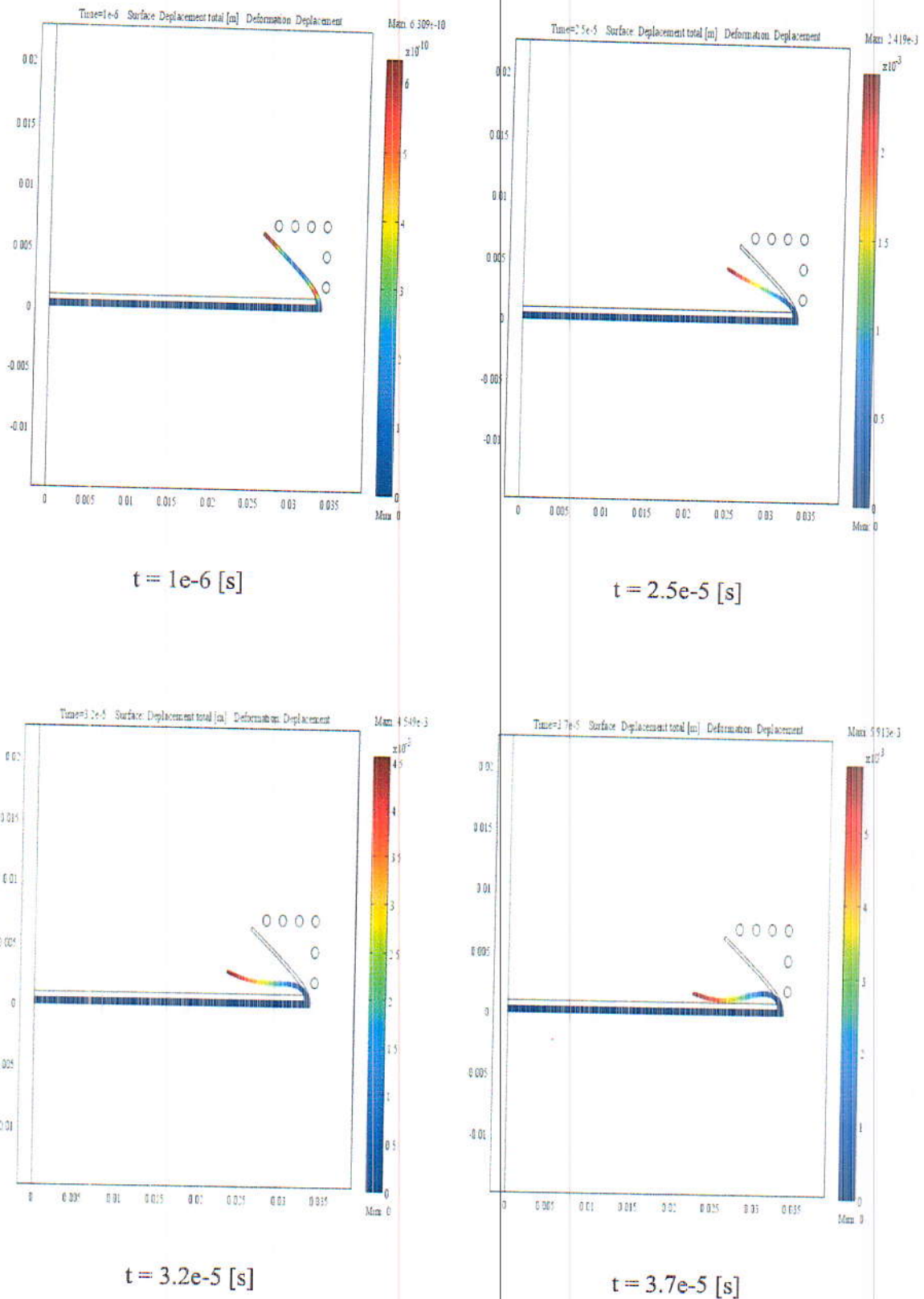


Figure III.41 : Ourlage de la pièce à différents instants

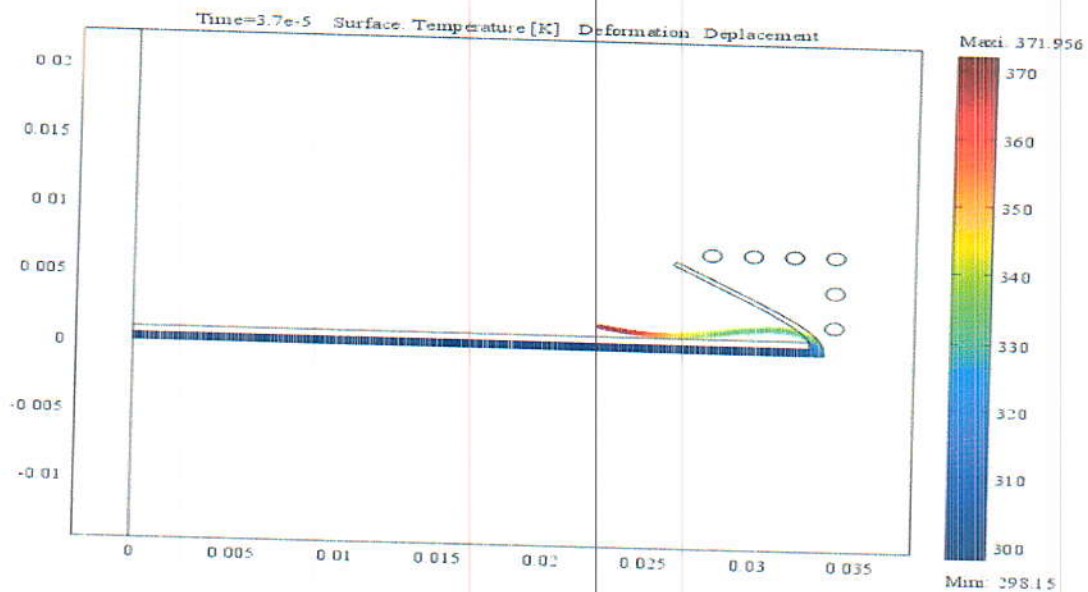


Figure III.42 : Distribution de la température à $t = 3.7e-5$ [s]

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 le déplacement et la déformation ainsi que la répartition de la température le long des pièces déformées.

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 comme l'emboutissage de plaques, le fléchissement, le flambage, le pliage et l'ourlage. 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 de pliage par impulsion magnétique a été réalisée. Différentes opérations ont été simulées et les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les opérations industrielles du formage magnétique, en particulier l'emboutissage, le fléchissement, le flambage et le pliage sont fortement affectés par les caractéristiques et les paramètres du système et de l'installation de FEM.
- Le pliage par impulsion magnétique nécessite plus d'énergie, mais il s'effectue pendant les premiers instants de formage. Donc il est rapide mais exige des générateurs de fortes puissances.
- Durant les processus de formage EM, particulièrement le pliage, les matériaux se comportent de manière différente suivant leurs caractéristiques électromagnétiques et mécaniques.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif global de ce travail est de développer un modèle numérique pour le processus FEM. Les études expérimentales peuvent être très coûteuses, alors que les analyses numériques sont comparativement économiques et permettent d'étudier une gamme plus large de paramètres dans une période courte. En utilisant les dernières techniques dans le domaine informatique, un outil numérique plus simple, toujours robuste et efficace a été développé au cours de notre étude, utilisant un logiciel multi-physique permettant l'analyse des différents phénomènes physiques mis en jeu dans les applications industrielles du FEM..

Le processus de formage électromagnétique est l'une des méthodes de formage à grande vitesse qui, contrairement aux méthodes classiques de formage, offrent des avantages remarquables.

Les résultats numériques obtenus sont satisfaisants et en bonne concordance avec ceux trouvés expérimentalement. [15] [30]

Ces modèles numériques visant à étudier des applications industrielles tout à fait innovantes dans l'industrie des voitures, en l'occurrence les applications de fléchissement, flambage et pliage nous ont permis une large analyse de ces procédés et des facteurs influant la déformation des matériaux utilisés:

- Le comportement magnéto-mécanique et thermique des pièces, lors de ces processus est fortement lié aux caractéristiques des installations industrielles, en particulier l'énergie des générateurs de décharge et les composants des circuits de charge et décharge utilisés.
- D'autre part, les dimensions des différents constituants des systèmes de formage : inducteur et pièces ont un effet notable sur les formes obtenues, le temps de formage et la température d'échauffement des tôles formées.
- En outre, la simulation numérique permet d'étudier le comportement de différents matériaux et prévoir les exigences et les limites de chacun.

Cette étude numérique, bien qu'elle nous a fournis toutes ces remarques et conclusions et a permis de retrouver des résultats expérimentaux, néanmoins ces modèles numériques ne restent pas sans limites, du fait qu'ils sont bidimensionnels à symétrie axiale, ils ne peuvent simuler toutes les applications industrielles. [15] [30]

Conclusion Générale

En perspectives, ces modèles peuvent donc être étendus en modèles tridimensionnels permettant de simuler d'autres applications et formes plus complexes et d'autres procédés industriels de FEM.

D'autres aspects peuvent être affinés, comme la nature des matériaux utilisés dans la fabrication des inducteurs, leurs formes et leurs dimensions, ainsi que la forme, la fréquence et l'amplitude des courants de décharge et donc la génération du champ magnétique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Thèse de doctorat, « Etude et modélisation numérique tridimensionnelle des effets mécaniques de champ électromagnétique », Hafsaoui Ilhem née Boutana, Université de Jijel, 2009.
- [2] Muhammad Ali SIDDIQUI, « Numerical modelling and simulation of Electromagnetic Forming Process », thèse de doctorat, L'institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg, le 26 juin 2009.
- [3] <http://www.bmax.com/quand-la-vitesse-est-une-alliee/>
- [4] http://thelibraryofmanufacturing.com/high_energy_rate_forming.html
- [5] <http://www.bmax.com/fr/technologie/electro-hydro-formage/>
- [6] <https://www.slideshare.net/garacaloglu/ch6-sheetmetw-proc-1>
- [7] 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.
- [8] Hervé GALUZZI, « Etude et application des champs magnétiques intenses au soudage d'éléments tubulaires en aciers inoxydables », Institut de Recherche Technologique et de Développement Industriel, 1986.
- [9] <http://www.bil-ibs.be/fr/onderzoeksproject/soudage-des-toles-par-impulsion-electromagnetique>
- [10] <https://www.google.dz/#q=parmi+les+%C3%A9l%C3%A9ments+n%C3%A9cessaires+pour+une+installation+du+soudage+par+impulsion+magn%C3%A9tique+>
- [11] www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnetique.
- [12] <https://books.google.dz/books>.
- [13] « L'électromagnétisme et la mise en forme des matériaux », laboratoire mécanique de Rouen 16 avril 2009, David cardinaux.

- [14] Victor SONGMENE, Ph.D Professeur, génie mécanique, « Mise en forme par déformation plastique ».
- [15] Jianhui Shang, Larry Wilkerson, and Steve Hatkevich, « Hemming of Aluminum Alloy Sheets Using Electromagnetic Forming », Journal of Materials Engineering and permormance, July 2011.
- [16] B.Bendjima, “contribution à la modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétique relatifs au magnétoformage », thèse de doctorat, saint Nazaire 1997.
- [17] <http://www.bmax.com/fr/applications/automobile/>
- [18] http://cordis.europa.eu/result/rcn/84246_fr.html
- [19] THÈSE DE DOCTORAT « Méthodes d’homogénéisation pour la modélisation électromagnétique de matériaux composites », Valentin Préault, UNIVERSITÉ PARIS-SUD, 06/12/2013.
- [20] NEHAL OUASSILA, « Etude et modélisation des paliers planaires», UNIVERSITÉ MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.
- [21] V.J.Vohout, « Ahybrid Quasi-static/dynamic process for forming large sheet metal parts form aluminum alloys », Ph.D dissertation, the Ohio state university, Columbus, 1998.
- [22] D.A Olivera, « Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy sheet: Experiment and model », Thèse de Master, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2002.
- [23] A.Boussavit, « A Numerical approach to transient 3D non linear eddy current problems », in Applied Electromagnetics in materials, pp.65-75, 1990.
- [24] V.S.Arpaci, « Introduction to heat transfert », Prentice Hall, upper Saddle River, 1999.
- [25] COMSOL Multiphysics 3.5.
- [26] Peeteenut TRIWONG, « Modélisation numérique 3D des phénomènes couplés dans les procédés d’élaboration par induction : couplage faible et couplage fort », INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, le 11 Juillet 2008.
- [27] Bahamma Hacene, « Etude géométrique des inducteurs utilisés dans une cuisson par induction », Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2014.



- [28] Youcef 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 Science en Génie Electrique option : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [29] Soualmia Asma, « Conception et modélisation d'inducteurs pour la fusion par induction », mémoire fin d'étude, université de Constantine, juin 2014.
- [30] N. Takatsu, M. Kato, K. Sato, T. Tobe « High speed forming of metal sheets by electromagnetic force », JSME International journal, Vol. 31, N° 1, pp 142-148, 1998.
- [31] 3D Numerical simulation method of electromagnetic forming for low conductive metals with a driver ,Fenqiang Li & Jianhua Mo & Haiyang Zhou & Yang Fang, Received: 20 November 2011 / Accepted: 29 March 2012 / Published online: 3 May 2012.
- [32] Electromagnetic Hemming of Aluminum Sheets using FEM
A. Rajak, S. Kore, Research Scholar, Associate Professor, Indian Institute of Technology Guwahati, Assam-781039, India.

RESUME

Le magnétoformage est un procédé de mise en forme des métaux à grande vitesse permettant de déformer des pièces métalliques en déchargeant un courant intense à travers une bobine se situant à proximité de la pièce à déformer.

Le principal objectif de ce travail est de développer les outils numériques nécessaires pour modéliser des systèmes de formage magnétique.

Les modèles numériques développés sous environnement COMSOL sont destinés à étudier, analyser et prévoir les déformations plastiques des pièces déformées expérimentalement.

Les applications de ce travail concernent des procédés industriels très innovant, particulièrement le pliage par impulsion magnétique, utilisé dans l'industrie d'automobiles.

Les résultats numériques obtenus sont comparés et validés par des travaux expérimentaux.



ABSTRACT

Magnetic forming is a process for shaping metals at high velocity to deform metal parts by discharging an intense current through a coil located in the vicinity of the part to be deformed.

The main objective of this work is to develop the numerical tools necessary to model magnetic forming systems.

The numerical models developed under COMSOL environment are intended to study, analyze and predict the plastic deformations of the deformed parts experimentally.

The applications of this work relate to very innovative industrial processes, particularly magnetic pulse bending, used in the automotive industry. The numerical results obtained are compared and validated by experimental work.