

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 Modélisation du Soudage de Pièces Industrielles par  
Impulsion Magnétique**

Par :

**Abdenour BAHLOUL**

Et

**Souhil BOUKENDIR**

Travail proposé et dirigé par :

**Dr. I. HAFSAOUI**

**Promotion 2019**

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



# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, également nous remercions infiniment nos parents, qui nous ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de notre formation. Nous tenons à remercier tous ceux et celles qui ont contribué à finaliser ce modeste travail.*

*Nos remerciements vont à Mme I.HAFSAOUI notre encadrant pour nous avoir guidé pour la réalisation de ce projet. Nous remercions vivement les étudiants Master-II Electromécanique pour leur aide morale durant toute la période de préparation et surtout Amine, Moustafa, Issam, Mohammed et Abdessamed*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et assisté durant nos études et nous exprimons toute notre gratitude à Dr.Kechicheb, Dr.Boukhenef, Dr.Maouche, Mr.Khedimallah et tous les enseignants qui nous ont formé.*

*Souhil et Abdenour*

# DEDICACES

## *À MES TRES CHERS PARENTS*

*Quoi que je fasse que je dise, je ne saurais point vous remercier comme il se doit, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération. Votre affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mon très cher frère Mohamad Seddik et mes belles sœurs Souhila,*

*Hadjer, Khawla et Bessmala.*

*A mes très chers collègues et surtout Nassim et Abdenour.*

*Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite*

*Souhil*

# DEDICACES

## *À MES TRES CHERS PARENTS*

*Quoi que je fasse que je dise, je ne saurais point vous remercier comme il se doit, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération. Votre affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mon très cher frère Ammar et mes belles sœurs Amel*

*Rabiha, Fatima Zohra et Youssra*

*A mes très chers collègues et surtout*

*Amine, Seyffeddine, Abderrahmane et Lamine.*

*Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite*

*Abdenour*

# Table de matière

Liste des Figures .....	viii
Liste des Tableaux .....	xii
Introduction Générale .....	2
Chapitre I.....	5
I-1 Formage électromagnétique.....	5
I-1-1 Assemblage.....	5
I-1-2 Formage .....	6
I-1-3 Soudage.....	6
I-2 Technique de soudage.....	6
I-2-1 Définition du soudage .....	6
I-2-2 Classification des procédés de soudage .....	7
I-2-3 Différents types de soudage électrique .....	7
I-3 Soudage par impulsion magnétique.....	9
I-3-1 Définition.....	9
I-3-2 Principe de fonctionnement .....	10
I-3-3 Mise en œuvre : la machine du SEM.....	11
I-3-4 Fonctionnement de l'installation typique de SEM .....	13
I-4 Paramètres du processus .....	14
I-5 Pourquoi SEM?.....	15
I-5-1 Motivation.....	15
I-5-2 Comparaison avec d'autres méthodes de soudage.....	15
I-6 Applications du soudage par impulsion magnétique .....	15
I-7 Avantages du SEM .....	18
I-8 Limitations et inconvénients du SEM.....	19
Chapitre II .....	22
II-1 Phénomènes électromagnétiques.....	22
II-1-1 Equations de Maxwell .....	22

II-1-2 Lois de comportement du milieu .....	23
II-1-3 Propriétés des matériaux .....	24
II-1-4 Conditions de passage .....	25
II-1-5 Potentiel scalaire électrique V et potentiel vecteur magnétique A.....	26
II-1-6 Equation électromagnétique .....	26
II-1-7 Calcul des grandeurs électromagnétiques .....	26
II-2 Phénomènes Mécaniques .....	27
II-2-1 Loi de HOOKE.....	28
II-2-2 Contrainte de déformation.....	28
II-2-3 Allongement .....	28
II-2-4 Module de Young.....	29
II-2-5 Equation d'équilibre .....	30
II-2-6 Relation déformation-déplacement .....	30
II-2-7 Relation contrainte-déformation.....	31
II-2-8 Symétrie axiale .....	32
II-3 Conditions aux limites.....	33
II-3-1 Axe de symétrie.....	33
II-3-2 Isolation magnétique .....	33
II-3-3 Encastrement .....	33
II-4 Couplage.....	33
II-4-1 Couplage faible.....	33
II-4-2 Couplage fort.....	34
II-4-3 Termes de couplage.....	34
II-5 Logiciel de résolution.....	34
Chapitre III.....	38
III-1 Soudage des plaques .....	38
III-1-1 Soudage de plaques similaires Al-Al.....	39
III-1-2 Soudage de plaques dissimilaires.....	41

III-2 Soudage des tubes .....	47
III-2-1 Soudage des tubes avec inducteur central .....	47
III-2-2 Soudage des tubes avec inducteur périphérique.....	55
III-3 Applications industrielles.....	57
III-3-1 1 <sup>ère</sup> Application industrielle.....	57
III-3-2 2 <sup>ème</sup> Application industrielle .....	61
III-3-3 Soudage des tubes par conformateur de champ .....	68
Conclusion Générale .....	76
Bibliographie.....	79



## Liste des Figures

<i>Figure I-1: Le champ magnétique généré par la bobine lors du soudage de tubes [5]</i> .....	6
Figure I-2: Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie utilisée [8].....	7
Figure I-3: Procédé de soudage Laser (1): Faisceau laser (2): Plastique transparent (3): Plastique absorbé (4): Zone de diffusion (5): Pression d'assemblage [10] .....	7
Figure I-4: Soudage à l'arc sous flux [10] .....	8
Figure I-5: Soudage électro-gaz [11] .....	8
Figure I-6: Soudage par résistance [11] .....	9
Figure I-7: Principe de fonctionnements du soudage par impulsion magnétique [12] .....	10
Figure I-8: Soudage de tubes (1) Pièce intérieure, (2) Pièce extérieure, (3) L'inducteur[5] .....	10
Figure I-9: Différents éléments constitutifs de la machine du SEM [11] .....	11
Figure I-10: Equipement typique de SEM [12].....	11
Figure I-11: Equipement de stockage d'énergie [13].....	12
Figure I-12: (a) Bobine multi spires de la machine de soudage, (b) la bobine multi spires démonté [13] .....	13
Figure I-13: Une bobine mono spire de la machine de soudage [13] .....	13
Figure I-14: Quelques domaines d'application du SEM. (1) Industrie automobile ; (2) Câbles ;(3) Énergie ;(4) Échangeurs thermiques ;(5) Électroménager ;(6) Constructions ;(7) Aérospatiale ;(8) Gaz et fluides.....	16
Figure I-15: Barres de combustible nucléaire [3] .....	17
Figure I-16: Autres pièces construites par SEM [17].....	18
Figure II-1: Test pour la détermination de l'allongement « s » [23].....	28
Figure II-2: Diagramme contrainte-déformation d'un matériau ductile [23] .....	29
<i>Figure III-1: Installation et géométrie du système de soudage des plaques.....</i>	38
<i>Figure III-2: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage utilisé .....</i>	39
<i>Figure III-3: Densité de courant induite (a) Distribution de la densité de courant induite le long de la plaque à souder au temps final <math>t=10 \mu s</math> (b) La densité de courant induit au milieu de la plaque en fonction de largeur de la plaque <math>x [m]</math> .....</i>	40

<i>Figure III-4: (a) Distribution de la force de Lorentz dans le système au <math>t=10 \mu s</math> ; (b) Force de Lorentz au milieu de la plaque durant la période de soudage</i> .....	40
<i>Figure III-5: Soudage des plaques dissimilaires (a) Soudage des plaques Al-Al à <math>t= 10 \mu s</math> ; (b) l'évolution temporelle de la déformation au milieu de la plaque le long de la durée du soudage Al-Al</i> .....	41
<i>Figure III-6: (a) Soudage Cu-Al à l'instant final <math>t= 12.5 \mu s</math> ; (b) Évolution temporelle de la déformation totale au milieu de la plaque durant la durée du soudage Cu-Al</i> .....	42
<i>Figure III-7: (a) le soudage Ti-Al à l'instant final <math>t= 47 \mu s</math> ; (b) L'évolution temporelle de la déformation totale au milieu de la plaque durant la durée du soudage Ti-Al</i> .....	42
<i>Figure III-8: (a) Distribution de la densité de courant induite;(b) Distribution de la force de Lorentz le long des différentes plaques à souder à <math>t=10 \mu s</math></i> .....	43
<i>Figure III-9: Déplacement maximal de la plaque à souder pour les différents couples de matériaux</i> .....	44
<i>Figure III-10: La déformation au milieu de la plaque à <math>t=10\mu s</math>, pour différents couples de matériaux</i> .....	44
<i>Figure III-11: La variation de densité de courant externe selon le type de matériaux</i> .....	45
<i>Figure III-12: Densité de courant induit le long de la plaque pour les différents matériaux à <math>t=10 \mu s</math></i> .....	46
<i>Figure III-13: Le déplacement total au milieu de la plaque à <math>t=10 \mu s</math> pour les différents matériaux</i> .....	47
<i>Figure III-14: Géométrie du système; (a) avec inducteur de 5spires. (b) avec inducteur de 3spires</i> .....	48
<i>Figure III-15: Densité de courant de décharge</i> .....	48
<i>Figure III-16: Soudage à <math>t=2e-5s</math> pour différents matériaux; (a) Soudage Al-Al; (b) Soudage Cu-Al; (c)Soudage Mg-Al</i> .....	50
<i>Figure III-17: Déplacement maximal du tube externe (inducteur à 5spires)</i> .....	51
<i>Figure III-18: Déplacement total au milieu de tube externe (inducteur à 5spires)</i> .....	51
<i>Figure III-19: Déplacement total au milieu de tube externe (inducteur à 3spires)</i> .....	52
<i>Figure III-20: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Al-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Al-Al</i> .....	53

<i>Figure III-21: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Cu-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Cu-Al</i> .....	54
<i>Figure III-22: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Mg-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Mg-Al</i> .....	55
<i>Figure III-23: Installations de soudage des tubes avec inducteurs périphériques ; (a) inducteur de 1spire ; (b) inducteur de 3spires ; (c) inducteur de 5spires</i> .....	56
<i>Figure III-24: Soudage des tubes Al-Al avec inducteurs périphériques; (a) inducteur de 1spire ; (b) inducteur de 3spires (c) inducteur de 5spires</i> .....	57
<i>Figure III-25: (a) Installation industrielle [28] ; (b) Géométrie de simulation COMSOL</i> .....	58
<i>Figure III-26: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage considéré (12752 éléments et 6439 nœud)</i> .....	58
<i>Figure III-27: Evolution temporelle du soudage à différents instants. (a) 3<math>\mu</math>s après le début de la décharge, (b) Déformation à t=9<math>\mu</math>s, (c) Après 9<math>\mu</math>s, (d) Soudage final à10<math>\mu</math>s</i> .....	59
<i>Figure III-28: Déformation de la plaque à différents instants; (a) Soudage Al-Al ; (b) Soudage Cu-Al</i> .....	60
<i>Figure III-29: Déformation finale au milieu de la plaque à t=10<math>\mu</math>s, Al-Al et Cu-Al</i> .....	61
<i>Figure III-30: (a) Photo du système de SEM [29]; (b) Géométrie de simulation COMSOL</i> .....	62
<i>Figure III-31: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage (15825 éléments et 1328 nœuds)</i> .....	62
<i>Figure III-32: Evolution temporelle du soudage, (a) Au début de la décharge, (b) A t=6.5<math>\mu</math>s, (c) Après 8.8<math>\mu</math>s. (d) au temps final de soudage t=11.75<math>\mu</math>s</i> .....	63
<i>Figure III-33: Evolution temporelle du soudage de l'application industrielle [29].</i> .....	64
<i>Figure III-34: Variation du déplacement maximal du tube externe au point (0.01028 ; 0.042641) pour cinq différents tests</i> .....	65
<i>Figure III-35: L'effet de la variation de valeur G sur le soudage des tube, (a) G=0.5mm, (b) G=1mm, (c) G=1.5mm, (d) G=2mm, (e) G=2.5mm</i> .....	66
<i>Figure III-36: Densité de courant de décharge selon l'entrefer G</i> .....	67
<i>Figure III-37: La ligne minimale de soudabilité des tubes d'acier ; (a) en termes du temps final de soudage; (b) en termes de la densité de courant de décharge requise</i> .....	67

<i>Figure III-38: (a) La géométrie 3D de l'installation, (b) Géométrie utilisée numériquement sans l'inducteur [17] .....</i>	<i>68</i>
<i>Figure III-39: (a) Densité de courant de décharge, (b) maillage utilisé (5900 éléments et 3010 nœuds) .....</i>	<i>69</i>
<i>Figure III-40: La géométrie de soudage des tubes avec inducteur massif .....</i>	<i>70</i>
<i>Figure III-41: (a) Soudage des tubes sans conformateur de champ; (b) Déplacement du point milieu du tube externe .....</i>	<i>71</i>
<i>Figure III-42: (a) Evolution temporelle de la densité de courant induite crée au milieu de tube externe; (b) L'évolution temporelle des forces de Lorentz .....</i>	<i>71</i>
<i>Figure III-43: Soudage avec conformateur de champ .....</i>	<i>72</i>
<i>Figure III-44: (a) Concentration du champ magnétique, (b) Distribution des courants induits le long du tube .....</i>	<i>73</i>
<i>Figure III-45: Déplacement au milieu de tube externe sans et avec conformateur de champ .....</i>	<i>73</i>

## Liste des Tableaux

<i>Tableau I-1: Exemples d'applications du soudage par impulsion magnétique dans le domaine énergétique [3].....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau I-2: Exemples d'applications du soudage par impulsion magnétique dans le domaine de transport [3].....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau III-1: Paramètres du système de soudage de plaques.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau III-2: Les différents courants de décharge.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau III-3: Propriétés physiques des matériaux.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau III-4: Propriétés électriques et mécaniques des matériaux utilisés [29].....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-5: Propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés.....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau III-6: Propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés [17].....</i>	<i>69</i>

---

*Introduction*

*Générale*

---

## **Introduction Générale**

Le soudage par impulsions électromagnétique ou simplement le soudage électromagnétique SEM est un processus qui a émergé au début des années 70, particulièrement dans l'industrie nucléaire, en raison de la technologie engendrée par les programmes d'énergie nucléaire [1].

Au cours de cette période, il y a eu un intérêt croissant pour cette technologie, non pas juste comme sujet de recherche intéressant, mais aussi comme processus de production bien accepté. Cependant, ce n'est que récemment que des équipements de soudage par impulsions magnétiques ont été développés [1], [2].

Avec le temps, l'utilité du SEM dans d'autres industries, comme l'industrie automobile, a été vérifiée. La volonté des entreprises de réduire les coûts, les cycles de temps et d'accroître la production a conduit les entreprises à rechercher des technologies plus efficaces afin de maintenir leur compétitivité et leur qualité [3].

Ce type de soudage appartient à la famille des technologies de formage à grande vitesse, particulièrement le formage électromagnétique. C'est une technique connue pour sa capacité à produire des composants complexes en termes de géométries et de composition, avec des matériaux à haute résistance ou à faible ductilité.

En effet, Le soudage par impulsions magnétiques est une technologie d'assemblage à l'état solide et à froid, qui permet de générer des liaisons métalliques fortes, et même avec des matériaux dissimilaires. Dans ce processus, les forces de Lorentz sont utilisées pour la déformation d'au moins l'une des deux pièces de jonction métalliques menant à l'impact à haute vitesse [3].

Cette étude vise à présenter une analyse sur SEM, décrivant ses principes et phénomènes physiques, mis en jeu, y compris une analyse paramétrique de l'équipement et des composants de l'installation.

La modélisation numérique du processus a fait l'objet de plusieurs études et applications présentées et discutées.

Enfin, des exemples d'applications industrielles sont fournis et simulés numériquement, principalement ceux montrant les avantages de ce processus. Les résultats numériques sont en concordance avec ceux trouvés expérimentalement.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Après l'introduction du sujet et les objectifs de ce travail. Le premier chapitre présente les aspects théoriques et industriels du processus de soudage par impulsions électromagnétiques, ses avantages et ses inconvénients. Le chapitre qui suit présente les modèles mathématiques régissant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques mis en jeu lors

de ce procédé de soudage électromagnétique, ces modèles mathématiques sont nécessaires pour le développement des outils numériques, sous l'environnement COMSOL, permettant la simulation de différentes applications théoriques et industrielles du SEM.

Ces applications feront l'objet du chapitre trois, où les résultats numériques seront analysés et interprétés.

Enfin, nous présentons les conclusions générales de ce travail, suivies de certaines suggestions de continuité pour les travaux futurs. Les perspectives offrent de nouvelles possibilités d'amélioration de nos modèles numériques.



---

# *CHAPITER I*

---

*Aspects Théoriques et  
Industriels du Soudage  
Électromagnétique*

---

# Chapitre I

## Aspects théoriques et industriels du soudage électromagnétique

### Introduction

Le processus du fromage électromagnétique est l'une des techniques de fromage à grande vitesse les plus utilisées [4]. Parmi les applications industrielles du magnétoformage, nous distinguons le soudage électromagnétique (SEM), appelé aussi le soudage par impulsions magnétiques qui est l'objet de notre étude. Pour cela, nous commençons par l'exposition des aspects tant sur le plan théorique qu'industriel de ce procédé très innovant et de plus en plus utilisé dans l'industrie.

### I-1 Formage électromagnétique

Le fromage électromagnétique (FEM) ou magnétoformage est un procédé de mise en forme des métaux à l'aide d'efforts électromagnétiques à grande vitesse de déformation. La déformation se fait en déchargeant de fort courant pendant des instants de temps très courts (de l'ordre des millisecondes) à travers une bobine située au voisinage de la pièce à former [4].

Les principales opérations du magnétoformage sont classées couramment en trois groupes :

- Assemblage.
- Formage.
- Soudage.

#### I-1-1 Assemblage

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

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

### I-1-2 Formage

Dans la technique du formage magnétique, plusieurs applications sont possibles. Les trois opérations essentielles sont [4]:

- La compression.
- L'expansion.
- L'emboutissage.

### I-1-3 Soudage

Le Magnétoformage, grâce à sa haute vitesse de propulsion, est un procédé qui permet le soudage des matériaux. Généralement, il s'applique sur des pièces de forme tubulaire de petites épaisseurs (Figure I 1).

Il permet de "soudier" des matériaux qui peuvent être similaires ou dissimilaires tels que l'aluminium sur le cuivre, l'aluminium sur l'acier [4-5].

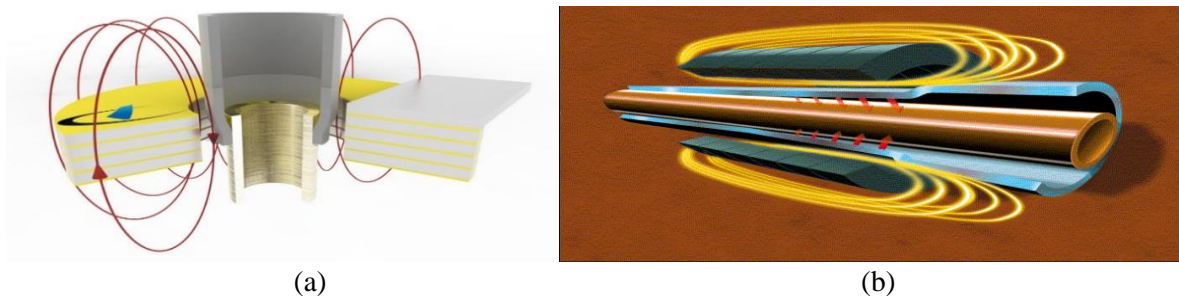


Figure I-1: Le champ magnétique généré par la bobine lors du soudage de tubes [5]

## I-2 Technique de soudage

### I-2-1 Définition du soudage

Le soudage permet, par définition de joindre, réunir ou faire adhérer des pièces d'une matière solide par fusion de parties en contact ou par l'intermédiaire d'une composition afin d'assurer une continuité de la matière [6]. Les méthodes de soudage sont nombreuses et choisies en fonction de l'usage prévu, de la matière à souder, de la forme des pièces à souder.

La soudure est le résultat de l'opération de soudage. Le soudage, moyen d'assemblage permanent, est le premier procédé d'assemblage en mécanique et en construction. Il se retrouve dans tous les domaines, de la simple plomberie à la construction navale, automobile, aérospatiale, en passant par le génie civil.

Son grand atout comparé aux autres techniques d'assemblage, est qu'il permet une continuité de la matière. De plus, il répond à des sollicitations élevées, il est durable et étanche [7].

## I-2-2 Classification des procédés de soudage

La nature de l'énergie de chauffage est un moyen commode pour classer les procédés de soudage afin de faciliter leur mémorisation (Figure I- 2).



Figure I-2: Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie utilisée [8]

## I-2-3 Différents types de soudage électrique

### I-2-3-1 Soudage laser

Un système optique concentre l'énergie du faisceau laser, ( $10^5 \text{ W/cm}^2$  à  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ) et génère un capillaire rempli de vapeurs métalliques, dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion (Figure I- 3). Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces [9].

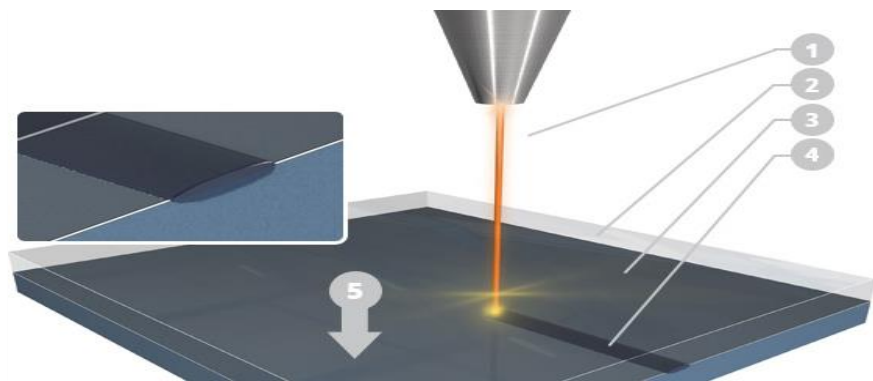


Figure I-3: Procédé de soudage Laser (1): Faisceau laser (2): Plastique transparent (3): Plastique absorbé (4): Zone de diffusion (5): Pression d'assemblage [10]

### I-2-3-2 Soudage à l'arc sous flux

Le procédé, appelé aussi: Soudage à arc submergé (*Submerged Arc Welding SAW*), consiste à effectuer un joint de soudure sur de l'acier à l'aide d'un arc électrique qui est submergé de flux en poudre (Figure I-4). Ce procédé de soudage est effectué à l'aide d'un robot, ce qui lui apporte une grande régularité. Deux robots, positionnés l'un en face de l'autre, peuvent effectuer une soudure pleine pénétration d'un acier de forte épaisseur sur de longues distances (plusieurs mètres). Ce procédé est surtout utilisé pour la fabrication de pièces en série [9].

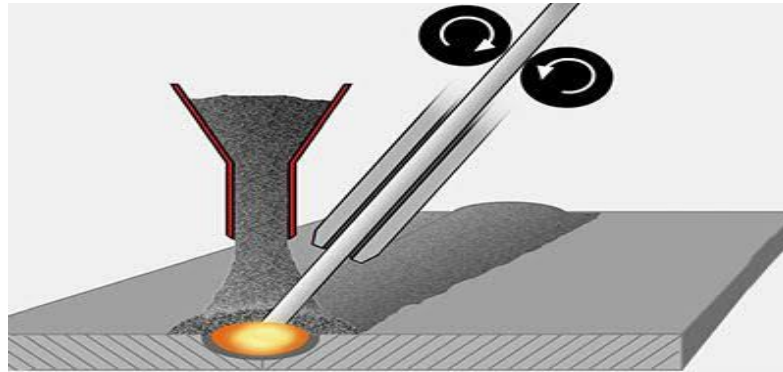


Figure I-4: Soudage à l'arc sous flux [10]

### I-2-3-3 Soudage électro gaz

Le soudage électro-gaz est un développement du soudage sous laitier électro-conducteur auquel il ressemble quant à sa conception et son utilisation. Au lieu de fondre dans un laitier, l'électrode fond dans un arc entouré d'un gaz de protection (Figure I- 5). Cette méthode est utilisée pour des tôles de 12 à 100 mm [9].

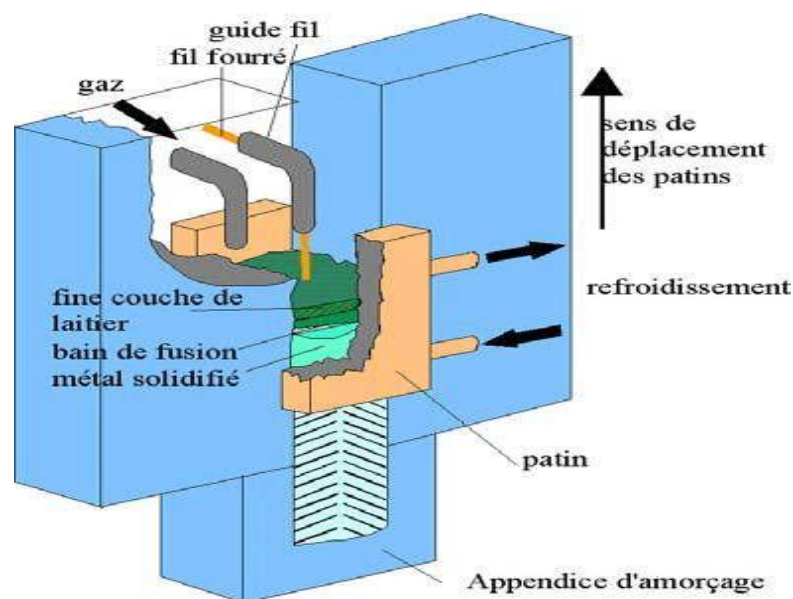


Figure I-5: Soudage électro-gaz [11]

### I-2-3-4 Soudage électrique par résistance

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage. Pour souder, une pince plaque des électrodes en cuivre, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'en éviter la fusion, qui se trouve limitée à la zone de contact entre les deux feuilles à souder (Figure I- 6). Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance) électrique des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur [9].

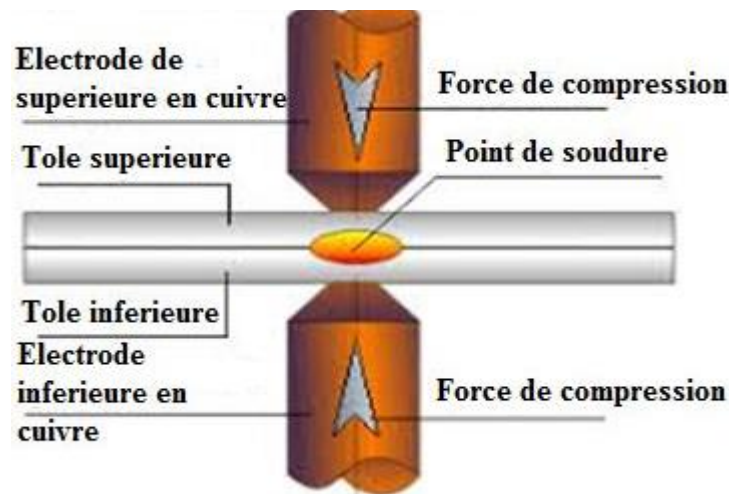


Figure I-6: Soudage par résistance [11]

Le soudage de certains matériaux demeure un problème pour l'industrie. En effet les méthodes traditionnelles ne permettent pas de souder tout type de matériaux. C'est la raison pour laquelle elle se tourne vers des méthodes récentes telles que l'impulsion magnétique. Un des principaux avantages de cette méthode est de pouvoir souder à température ambiante. De plus, des matériaux différents peuvent être soudés ensemble [11].

## I-3 Soudage par impulsion magnétique

### I-3-1 Définition

Le soudage par impulsion magnétique (*Magnetic Pulse Welding MPW*) est utilisé industriellement depuis 1967. C'est un procédé qui permet d'assembler deux surfaces entre elles, en les compressant l'un contre l'autre à une vitesse élevée et avec une grande force [9].

Cette force magnétique est générée par une bobine d'induction qui est traversée par un flux d'énergie bref et puissant.

La technique n'est pas nouvelle, elle a déjà été expérimentée dans les années 1960, mais la grande différence est que les composants électriques nécessaires au procédé - de puissants condensateurs et des commutateurs à haute vitesse - ont été optimisés et coûtent donc moins cher [13].

### I-3-2 Principe de fonctionnement

La technologie de soudage électromagnétique (SEM) à grande vitesse est un procédé d'assemblage automatique très innovant, en plein développement actuellement et basé sur l'utilisation des forces électromagnétiques appropriées pour assembler des produits tubulaires.

Le principe de fonctionnement de base de ce processus est schématisé sur (Figure I- 7).

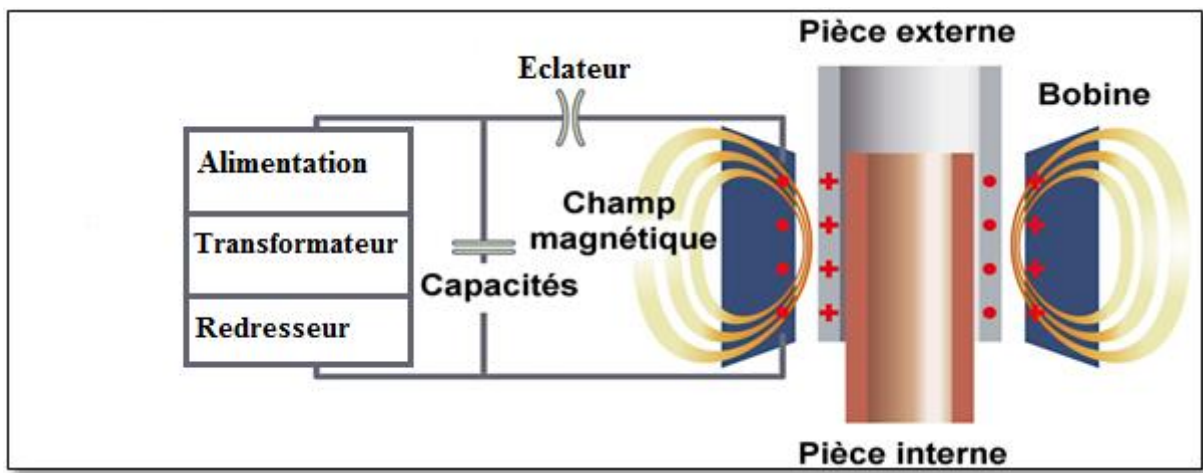


Figure I-7: Principe de fonctionnements du soudage par impulsion magnétique [12]

La figure (Figure I-8) montre le principe de soudage des tubes par compression. Dans cette configuration, les pièces tubulaires à souder, sont introduites 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 tube une force radiale dirigée vers l'intérieur, dépassant largement la limite élastique du métal.

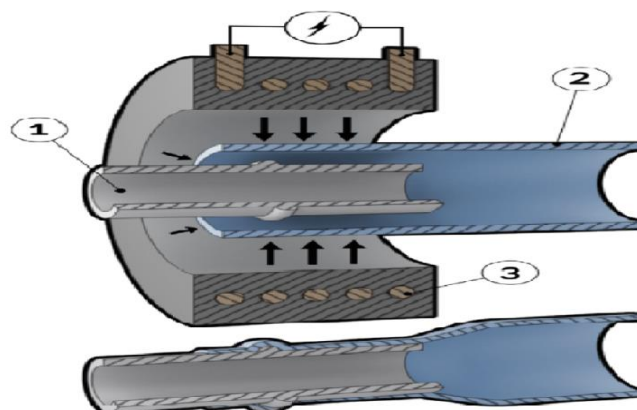


Figure I-8: Soudage de tubes (1) Pièce intérieure, (2) Pièce extérieure, (3) L'inducteur[5]



### I-3-3 Mise en œuvre : la machine du SEM

Le soudage magnétique appelé, couramment, le magnétosoudage utilise des forces électromagnétiques pour créer une « soudure froide », à température ambiante. Le temps de cycle est de quelques microsecondes et la zone assemblée est plus résistante que les matériaux de base. Ce procédé ne requiert ni chaleur, ni matériau d'apport, ni gaz de protection. Cela nécessite un équipement spécial pour obtenir de bons résultats.

La chaîne énergétique d'une machine de SEM (Figure I-9) est composée d'une succession de différentes étapes où l'énergie est transformée pour conduire finalement à la soudure de deux pièces conductrices.

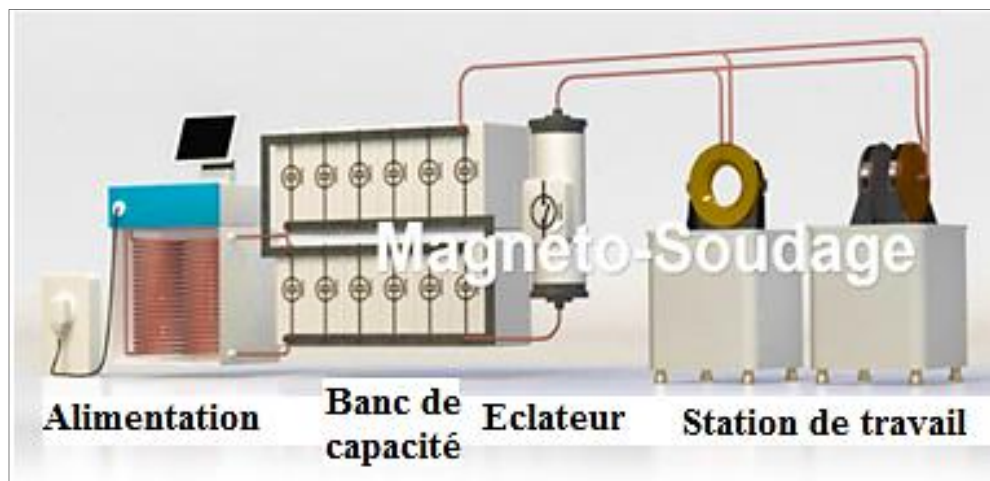


Figure I-9: Différents éléments constitutifs de la machine du SEM [11]

Un système typique de soudage par impulsions magnétiques (Figure I-10) comprend une alimentation, qui contient un bloc de condensateurs, un système de commutation à grande vitesse et une bobine. Les pièces à joindre sont insérées dans la bobine, le banc des condensateurs est chargé et le commutateur à grande vitesse est activé. Comme le courant est appliqué à la bobine, un champ magnétique est créé et donc les composants externe et interne sont soudés [12].

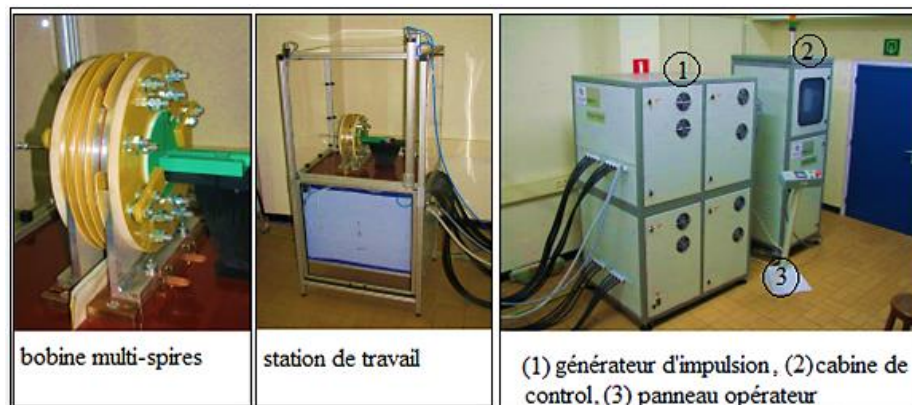


Figure I-10: Equipement typique de SEM [12]



### ***I-3-3-1 Cabine de contrôle***

C'est la première partie où se trouvent les outils de commande et de sécurité, tels que les fusibles et les interrupteurs. S'y trouvent aussi les transformateurs de courant et les redresseurs AC/DC, le système d'allumage ainsi que le circuit de contrôle.

### ***I-3-3-2 Générateur d'impulsions***

C'est la deuxième partie où se trouvent les condensateurs, stockant l'énergie déchargée. Ces générateurs sont des machines capables de délivrer des impulsions électriques de grandes amplitudes sous des tensions de quelques kilovolts. Le système doit donc être capable de stocker une forte quantité d'énergie sous une forme facilement exploitable et de la libérer en une centaine de microsecondes.

Plusieurs méthodes de stockage de l'énergie électrique peuvent être utilisées, les impulsions électriques sont obtenues par la décharge d'une batterie de condensateurs (Figure I-11).



*Figure I-11: Equipement de stockage d'énergie [13]*

### ***I-3-3-3 Station de travail***

Une bobine multi spires dans laquelle les tubes sont placés compose avec quelques autres éléments la troisième partie (Figure I-12). Dans certaines applications du SEM, la bobine peut être mono spire (Figure I-13)

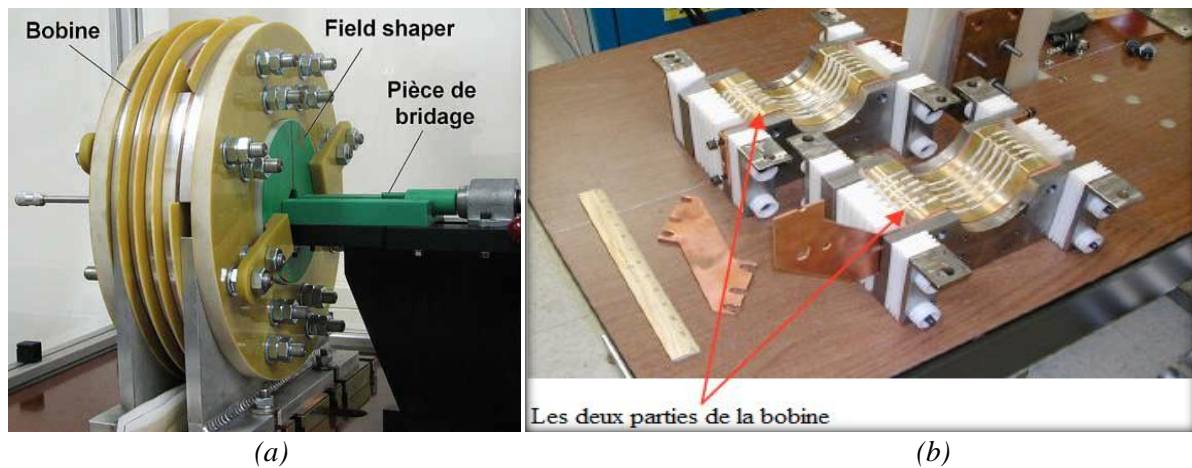


Figure I-12: (a) Bobine multi spires de la machine de soudage, (b) la bobine multi spires démonté [13]



Figure I-13: Une bobine mono spire de la machine de soudage [13]

#### I-3-4 Fonctionnement de l'installation typique de SEM

Le chargeur est alimenté par le réseau d'énergie électrique triphasé; à l'aide d'une succession de deux transformateurs, cette tension alternative est ensuite redressée en moyenne tension continue à l'aide d'un ensemble de redresseurs.

L'énergie électrique sous forme de tension continue est alors stockée dans l'accumulateur sous forme d'énergie électrostatique dans un banc de plusieurs condensateurs montés en parallèle. L'énergie stockée est graduellement augmentée via la tension de charge commandée par l'unité de contrôle d'énergie.

Lorsque la tension de décharge a atteint le seuil fixé, l'éclateur décharge très rapidement l'énergie électrostatique des condensateurs dans l'inducteur. Lors de cette décharge, dont la durée est de l'ordre de  $\mu\text{s}$ , des courants électriques extrêmement élevés de l'ordre de plusieurs centaines de kA sont générés.

La circulation de ce courant élevé à travers l'inductance génère très brusquement un champ d'induction magnétique dans la bobine et donc, il y a une transformation d'énergie électrique en énergie magnétique. Le champ magnétique ainsi créé peut posséder une grande amplitude (de l'ordre de plusieurs dizaines de teslas [T]), il est fortement variable au cours du temps, et donc génère dans la pièce conductrice extérieure à souder des courants induits.

L'interaction entre le champ magnétique primaire créé par la bobine et les courants induits dans la pièce métallique conductrice extérieure génère des forces importantes d'origine magnétique, forces agissant mécaniquement sur la pièce extérieure dans laquelle circulent les courants de Foucault [14].

#### **I-4 Paramètres du processus**

Comme dans tous les procédés industriels, la qualité des soudures par impulsions magnétiques dépend de nombreux paramètres du processus. La majorité de ces paramètres sont invariables tout au long du processus, soit parce qu'ils sont inhérents à l'équipement du soudage par impulsion magnétique, ou parce qu'ils sont choisis pour être maintenus constants [14].

Les paramètres du processus sont:

- Propriétés matérielles :
  - La perméabilité magnétique.
  - La conductivité électrique.
  - Les propriétés mécaniques.
  - La densité.
  - La conductivité thermique.
- Les paramètres d'influence :
  - Vitesse d'influence.
  - Angle d'influence.
- Propriétés géométriques :
  - La largeur de l'entrefer.
  - La forme des pièces.
  - La concentricité.
  - L'épaisseur de la pièce extérieure.
  - Le diamètre du tube extérieur.
  - La position relative du conformateur.
- Paramètres électriques :
  - La tension d'application.
  - L'intensité du courant de décharge.
  - La fréquence du courant de décharge.

## **I-5 Pourquoi SEM?**

### **I-5-1 Motivation**

Depuis de nombreuses années, la conception multi-matériaux est une stratégie bien connue qui permet de gagner du poids et de construire des produits plus performants tout en réduisant les coûts de fabrication, mais la réalisation de produits multi matériaux est souvent limitée par la technologie d'assemblage. Les techniques conventionnelles (thermiques) atteignent leurs limites lorsqu'il s'agit d'associer des combinaisons de matériaux présentant des températures de fusion significativement différentes tels que l'aluminium et l'acier inoxydable ou le cuivre et l'aluminium...etc.

Le soudage par impulsions magnétiques est un processus écologique utilisé pour concevoir et construire des structures légères à haute résistance [15].

### **I-5-2 Comparaison avec d'autres méthodes de soudage**

Le soudage par impulsions magnétiques est une technologie complètement différente des autres procédés de soudage conventionnels car le processus est effectué à grande vitesse, sans chaleur et sans matériaux consommables.

En effet, la comparaison du SEM avec d'autres méthodes de soudage montre qu'il est la meilleure méthode de conception et de construction des structures légères à haute résistance. De plus, c'est un procédé de soudage à froid, sans chaleur, avec des vitesses d'impact élevées et permet de souder des matériaux dissemblables.

Enfin, Le processus de SEM est un processus vert, sans effet sur l'environnement et plus rapide que les autres types de soudage. Donc, il est plus productif [16].

## **I-6 Applications du soudage par impulsion magnétique**

Le soudage par impulsions magnétiques était négligé jusqu'aux années 70, depuis, on a commencé à l'étudier et développer après qu'il n'était utilisé que dans les applications de l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, on peut constater l'utilisation du SEM dans différents secteurs comme l'automobile ou l'électrique (Figure I-14). Il devient un processus de faisabilité importante, les industries commencent à l'utiliser dans une grande série de production, où il est nécessaire de réduire le poids des composants avec la qualité maintenue [3].

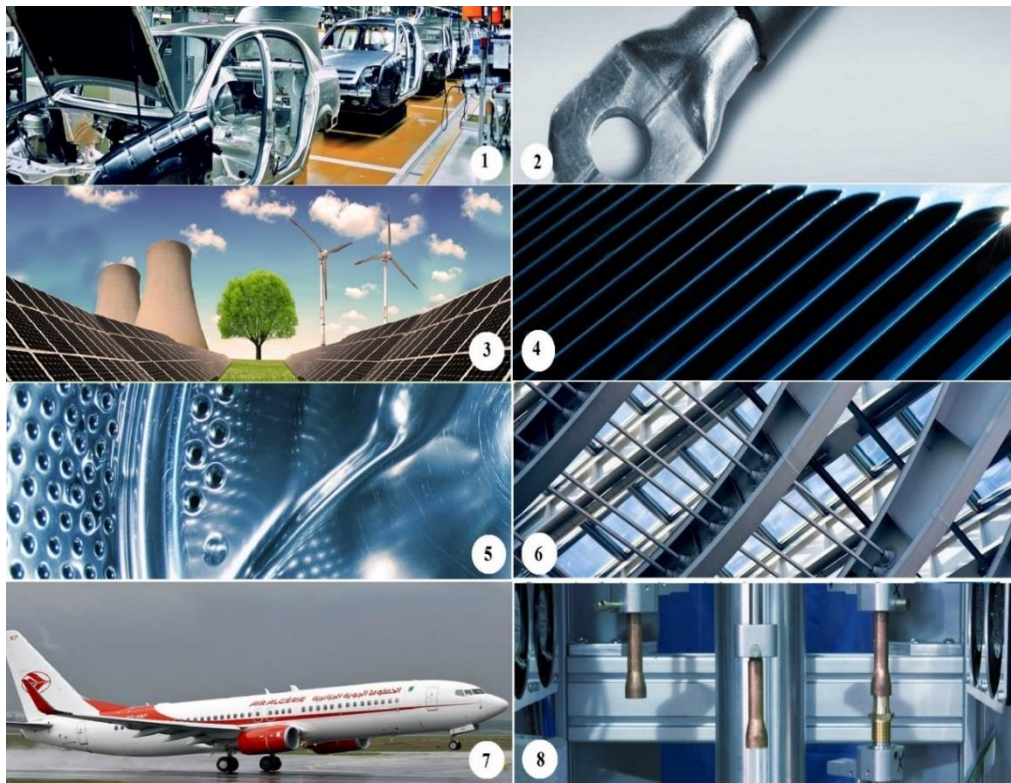


Figure I-14: Quelques domaines d’application du SEM. (1) Industrie automobile ; (2) Câbles ;(3) Énergie ;(4) Échangeurs thermiques ;(5) Électroménager ;(6) Constructions ;(7) Aérospatiale ;(8) Gaz et fluides

Les tableaux suivants présentent quelques exemples de composants réalisés par le processus du SEM dans des différentes industries :

Tableau I-1: Exemples d’applications du soudage par impulsion magnétique dans le domaine énergétique [3]

Industrie nucléaire	Industrie électrique
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soudage de bouchons de fermeture.</li> <li>• Soudage de fermetures d'extrémités de barres de combustible nucléaire.</li> <li>• Soudage de bidons métalliques.</li> <li>• Soudage des aiguilles de combustible nucléaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusibles électriques.</li> <li>• Composants de moteurs électriques</li> <li>• Gaines de câbles.</li> <li>• Soudage de connecteurs sur câbles en cuivre.</li> <li>• Assemblage de joints de terminaison de câbles coaxiaux.</li> </ul>



Tableau I-2: Exemples d'applications du soudage par impulsion magnétique dans le domaine de transport [3]

Industrie automobile	Industrie aérospatiale
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbres de transmission.</li> <li>• Composants de la climatisation.</li> <li>• Filtres de fuel.</li> <li>• Composants de siège tubulaires.</li> <li>• Fixation des bagues de serrage sur les manchons en caoutchouc des amortisseurs.</li> <li>• Fixation de bandes de renforcement sur les filtres à huile</li> <li>• Cadres de l'espace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement des barres de commande en Aluminium.</li> <li>• Composants de pompes à carburant.</li> <li>• Soudage de cadres tubulaires sur récipients en composite enveloppés.</li> <li>• Longerons d'aile d'avion.</li> </ul>

L'industrie nucléaire est responsable de la découverte et du développement initial du soudage par impulsions magnétiques, par la production de bouchons de fermeture et de barres de combustible nucléaire. Ces pièces sont rapportées en tant que premiers composants produits à l'aide de la technique SEM.



Figure I-15: Barres de combustible nucléaire [3]



Figure I-16: Autres pièces construites par SEM [17]

### I-7 Avantages du SEM

Le soudage par impulsion magnétique est une nouvelle technologie de soudage économique, rapide, propre et à froid des métaux conducteurs pour des matériaux similaires ou dissimilaires. Les avantages du SEM tournent autour de plusieurs points:

- Comme le procédé utilise de la pression et pas de la chaleur, c'est un procédé de soudage "froid".
- SEM est un Processus vert et écologique étant donné qu'on ne produit pas de chaleur, rayons UV, d'étincelles, gaz ou fumées.
- Le soudage par impulsions magnétiques est une bonne alternative au brasage car il offre une plus grande répétabilité.
- Maintient la résistance mécanique du métal de base dans la plupart des matériaux, donc pas de distorsion des produits.
- La soudure produite est un véritable lien solide avec une haute précision.
- Coûts nettement inférieurs et une qualité et productivité beaucoup plus élevées.

- Assemblage rapide et économique de matériaux à soudabilité difficile, comme le soudage hétérogène entre métaux et alliages très différents.
- Développement de pièces complexes ou produits nouveaux qui ne sont pas réalisables avec les technologies actuelles.

Ainsi, la technologie de soudage magnétique peut remplacer les processus traditionnels, permet de fabriquer de meilleurs produits, avec de grandes performances, efficacité, répétabilité, et au moindre coût [14].

## **I-8 Limitations et inconvénients du SEM**

Bien que le soudage par impulsion magnétique présente de nombreux avantages, il reste une invention humaine et impose certaines limitations et présente certains inconvénients de la technologie.

En considérant les pièces à assembler, la géométrie et la taille des pièces à souder sont définies par la forme et la taille de la bobine ou du conformateur de champ. Certaines formes, telles que les pièces rectangulaires, sont difficiles ou même impossibles à souder car les côtés sont beaucoup plus faciles à se déformer que les angles.

Des joints à recouvrement sont nécessaires car la pièce extérieure doit avoir un impact sur la partie intérieure pour créer la soudure. De plus, la taille des pièces à souder est limitée par le coût de la machine, qui augmente considérablement pour les pièces de plus grandes dimensions [16].

D'autres inconvénients peuvent être cités :

- Le processus ne convient pas aux applications sur le terrain.
- Le processus est très sensible aux modifications des paramètres.
- Le soudage par impulsions magnétiques nécessite des matériaux avec une conductivité électrique élevée et une bonne aptitude au formage à froid.
- La qualité des soudures par impulsions magnétiques dépend beaucoup de paramètres du processus et beaucoup plus de la préparation de la surface et de la propreté des surfaces à assembler.
- Le SEM est toujours effectué avec un intervalle d'air entre le tube externe et la partie interne (distance requise pour la déformation et l'accélération du tube externe).
- Une condition pour le soudage par impulsion magnétique est que le matériau à déformer ait une bonne conductivité électrique. Sinon, il faudra augmenter l'énergie qui est nécessaire pour générer des courants induits, donc des générateurs d'impulsions plus grands et plus coûteux.
- Une autre condition est que les surfaces à assembler doivent se chevaucher [16].



## **Conclusion**

Bien que les avantages des techniques de magnétoformage, en particulier les procédés de SEM, les rendent des technologies très intéressantes dans le domaine industriel, la conception et la modélisation numérique de ces processus, restent complexes et nécessitent le développement de codes numériques performants capables d'étudier les phénomènes physiques qui se produisent durant le processus de SEM et de prévoir la déformation, les propriétés de l'impact et la soudabilité des matériaux durant le soudage par impulsion.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les modèles mathématiques et numériques régissant les phénomènes mis en jeu durant ce processus de SEM.

---

## *CHAPITRE II*

---

---

### *Modélisation du Soudage Par Impulsion Magnétique*

---

## Chapitre II

### Modélisation du soudage par impulsion magnétique

#### Introduction

Le soudage électromagnétique SEM sert à assembler localement deux pièces à grande vitesse et à froid, en utilisant des forces électromagnétiques. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique. La rapidité et la complexité de ces phénomènes génèrent un procédé difficile à modéliser.

Ce chapitre est consacré à l'analyse mathématique de ces phénomènes lors du processus de SEM. Nous présenterons donc les modèles mathématiques et les équations régissant le soudage des pièces industrielles par SEM.

#### II-1 Phénomènes électromagnétiques

Le processus de SEM fait appel à des différents phénomènes, en particulier, les phénomènes électromagnétiques qui sont principalement régis par les équations de Maxwell.

##### II-1-1 Equations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell [20]. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques, et qui unifient tous les principes de l'électromagnétisme, auxquelles il faut rajouter les équations de comportement des milieux. Ces équations permettent non seulement de décrire les champs électriques et magnétiques ainsi que leur interaction mais aussi de donner un cadre mathématique à ceux-ci [21]. Ces équations dans les milieux continus sont les suivantes:

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

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

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

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

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

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

Avec :

$\rho$  : Densité volumique de charge électrique. [ $C/m^2$ ]

❖ Les champs d'intensité :

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

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

❖ Les densités de flux :

$\vec{B}$  : La densité de flux ou induction magnétique. [ $Wb/m^2$ ] ou [ $T$ ]

$\vec{D}$  : La densité de flux ou induction électrique. [ $C/m^2$ ] ou [ $A.S/m^2$ ]

$\vec{J}$  : Densité de courant de conduction. [ $A/m^2$ ]

Les deux types de champ de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II.1- II.4) serait indéterminé.

### II-1-2 Lois de comportement du milieu

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, on rajoute aux équations précédentes les lois constitutives des matériaux ou les lois de comportement des milieux. Celles-ci lient les différents champs magnétiques et électriques entre eux [22,23]. Et Pour des matériaux linéaires et isotropes, ces équations sont données généralement sous les formes suivantes:

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

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

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

Avec :

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

Et :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$\mu_r$ : Perméabilité relative du milieu

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.2566370614 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$  est la perméabilité magnétique du vide.

$\varepsilon$ : Permittivité électrique des matériaux. [F/m]

Et :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

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

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

L'expression détaillée des densités de courants :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma[\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}] \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$\sigma$  : Conductivité électrique.

$\vec{J}_s$ : Densité du courant imposé dans l'inducteur.

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

$\sigma\vec{E}$ : Exprime le courant de conduction résultant dû au champ électrique  $\vec{E}$ .

$\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$  : Exprime le courant résultant dû au mouvement à la vitesse  $\vec{V}$ .

### II-1-3 Propriétés des matériaux [4]

Les relations constitutives (II.6) (II.7) (II.8) ont été introduites formellement. Ces relations qui semblent être simples peuvent être plus compliquées dans certains cas. Il existe quatre groupes principaux de matériaux.

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

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

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

Enfin, la dispersion décrit les changements de vitesse d'onde avec la longueur d'onde.

Dans le cas du domaine fréquentiel, la dispersion est exprimée par une dépendance des lois constitutives de la fréquence.

#### II-1-4 Conditions de passage

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités et ne sont par conséquent pas différentiables. Cependant, il est possible de déduire des conditions dites de transmission des champs [20] :

A la traversée d'une surface séparant deux milieux 1 et 2 différents et portant des charges vraies avec une densité superficielle, les relations locales s'écrivent :

$$\vec{E}_{T2} - \vec{E}_{T1} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$\varepsilon_2 \vec{E}_{N2} - \varepsilon_1 \vec{E}_{N1} = \sigma \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$\vec{E}_T$  et  $\vec{E}_N$  : Sont respectivement, la composante tangentielle et normale du champ électrique.

A la traversée d'une surface séparant deux milieux 1 et 2 différents et parcourue par des courants vrais de densité superficielle  $\vec{J}_S$ , les relations locales deviennent :

$$B_{N2} = B_{N1} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{1}{\mu_2} \vec{B}_{T2} - \frac{1}{\mu_1} \vec{B}_{T1} = \vec{J}_S \wedge \vec{n} \quad (\text{II.14})$$

Où :

$\vec{B}_T$  et  $\vec{B}_N$  : Sont respectivement, la composante tangentielle et normale du champ magnétique.

La condition de continuité de la composante normale de la densité du courant de conduction aux interfaces entre deux milieux de conductivités électriques différentes s'écrit:

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

Avec :

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

### II-1-5 Potentiel scalaire électrique V et potentiel vecteur magnétique A

Dans certains cas, il est plus utile de formuler le problème en termes de potentiels scalaire électrique V et potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  qui sont des outils mathématiques et sont des intermédiaires pour déterminer les champs électromagnétiques [24].

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.16})$$

$$\vec{E} = -\text{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.17})$$

### II-1-6 Equation électromagnétique

Les phénomènes électromagnétiques mis en jeu dans le processus de soudage magnétique sont régis par le modèle magnétodynamique qui s'applique aux dispositifs électrotechniques dans les sources de courant ou de tension varient en fonction du temps. Les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants induits [23]. En utilisant la formulation en potentiels et en considérant les matériaux isotropes, le système d'équations électromagnétiques à utiliser est le suivant :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{rot}(\mu^{-1} \text{rot} \vec{A}) - \sigma \vec{v} \times (\text{rot} \vec{A}) = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.18})$$

Avec:

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

### II-1-7 Calcul des grandeurs électromagnétiques [4], [23]

#### II-1-7-1 Courant de décharge

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

$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi \omega_0 t) \sin 2\pi f t \quad (\text{II.19})$$

Où :

$$\begin{cases} \xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

### II-1-7-2 Calcul des courants induits

Pour calculer les courants induits, il est nécessaire d'introduire les deux termes, le courant de conduction et celui dû au mouvement:

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \times (\text{rot } \vec{A}) \quad (\text{II.21})$$

### II-1-7-3 Forces électromagnétiques

Dans un système, la distribution des forces électromagnétiques dépend du matériau. Ainsi, les expressions et les techniques utilisées pour le calcul des forces électromagnétiques sont différentes selon les différents types de matériaux [25].

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

$$\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$\vec{F}$  : Force électromagnétique [N/m<sup>3</sup>].

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

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

## II-2 Phénomènes Mécaniques

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

En 1676, le physicien anglais Robert Hooke a énoncé la loi qui explique et modélise le comportement des matériaux soumis à des contraintes. Un matériau à l'état solide ne résiste à une force appliquée qu'en se déformant sous l'action de cette force [26].



La loi de HOOKE stipule que la déformation élastique est une fonction linéaire des contraintes. Sous sa forme la plus simple, elle relie l'allongement à la force appliquée.

### II-2-1 Loi de HOOKE

Selon la loi de Hooke, la contrainte ou pression «  $T$  » est proportionnelle à l'allongement relatif  $s$  avec un facteur constant «  $C$  » désigné sous le nom de module d'élasticité ou encore module de Young [23].

$$T = sC \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$T$  : Contrainte [N/m<sup>2</sup>]

$C$  : Module de Young

$s$  : Déformation [m]

### II-2-2 Contrainte de déformation [23]

Elle détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés et/ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qu'agit sur une unité de surface du matériau.

$$T = \frac{F}{A} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$F$  : Force appliquée [N]

$A$  : Surface [m<sup>2</sup>]

### II-2-3 Allongement [23]

C'est le rapport «  $s$  », entre l'allongement  $dx$  et la longueur initiale «  $x$  »

$$s = \frac{dx}{x} \quad (\text{III.25})$$

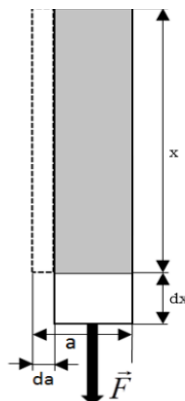


Figure II-1: Test pour la détermination de l'allongement «  $s$  » [23]

### II-2-4 Module de Young

Le module de Young ou module d'élasticité est une caractéristique du matériau ; c'est l'équivalent en mécanique des milieux continus de la raideur d'un ressort.

Comme pour un ressort, le métal sollicité a d'abord un comportement parfaitement élastique. La rigidité de ce métal est le module d'Young, habituellement noté  $E$  [27].

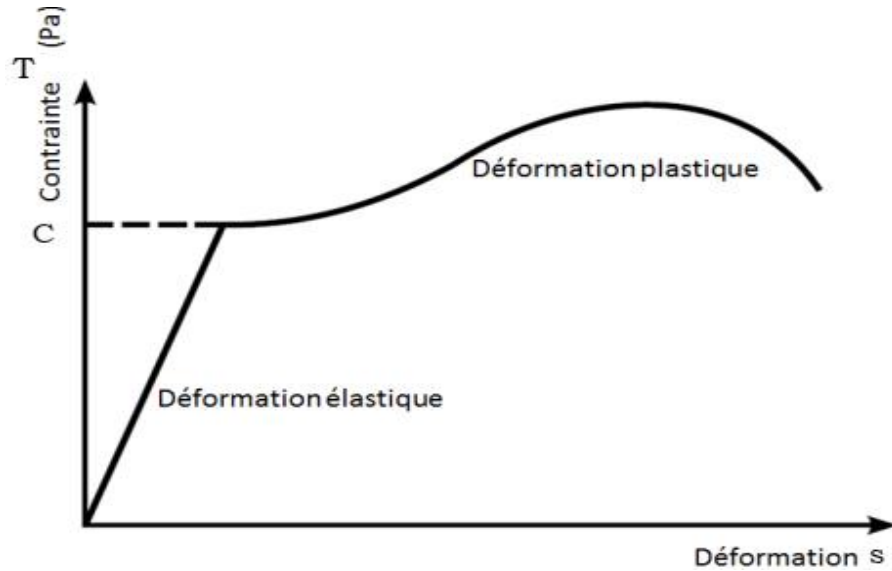


Figure II-2: Diagramme contrainte-déformation d'un matériau ductile [23]

L'application d'une force provoque initialement une déformation élastique. Cela se traduit sur le diagramme par une droite car la déformation est proportionnelle, pour un métal, à la contrainte (loi de HOOKE). Cette déformation élastique est réversible. Si la contrainte est annulée, l'éprouvette revient instantanément à sa forme initiale. Cette déformation élastique est suivie d'une déformation irréversible (permanente) appelée déformation plastique, qui se traduit sur le diagramme par une courbe qui se termine au moment de la rupture de l'éprouvette.

Il correspond à la pente de la partie linéaire élastique d'une courbe de traction [27]:

$$E = \frac{F/S_0}{\Delta L/L_0} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$F$  : L'effort appliqué lors d'un essai de traction.

$S_0$  : La section initiale de l'éprouvette testée.

$L_0$  : La longueur initiale de la zone utile de l'éprouvette.

$\Delta L$  : La différence entre la longueur  $L$  la longueur de la zone utile de l'éprouvette à un instant donné et  $L_0$ .

### II-2-5 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 [23]:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

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

$\sigma$  : Le tenseur de contraintes.

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

Dans le cas d'une analyse transitoire, où les charges et les contraintes sont variables dans le temps, l'amortissement visqueux peut être modélisé par l'amortissement de Rayleigh où le paramètre d'amortissement  $C$  est une combinaison linéaire de la masse  $m$  et l'élasticité  $K$  :

$$C = \alpha_{dM} \cdot m + \beta_{dK} \cdot K \quad (\text{II.28})$$

Avec:

$\alpha_{dM}, \beta_{dK}$ : Coefficients d'amortissement.

Dans notre modèle numérique, nous considérons un amortissement nul.

### II-2-6 Relation déformation-déplacement

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

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

Avec :

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

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

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

$\varepsilon_p$ : La déformation plastique.

$T$ : Température.

$T_{ref}$ : Température ambiante.

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

Les composantes de la déformation sont :

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

### II-2-7 Relation contrainte-déformation [4]

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

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

Avec :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{zy} = \tau_{yz}$$

Pour le comportement mécanique des matériaux non linéaires deux cas sont utilisés:

- ❖ Cas élastoplastique
- ❖ Cas isotrope

#### II-2-7-1 Cas élastoplastique

Dans le cas élastoplastique, la relation contrainte-déformation est donnée par:

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

Avec :

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

$E$ : Le module de Young.

$\nu$ : Le coefficient de poisson.

$\sigma_0$ : Contrainte initiale.

### II-2-7-2 Cas isotrope

Dans ce cas la matrice D est différente :

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Et :

$$\sigma = D_d \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{xy0} \\ \varepsilon_{yz0} \\ \varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$D_d = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Où G c'est le module de la rigidité. Dans le cas de matériaux isotropes, il est relié au module d'élasticité E et au coefficient de Poisson  $\nu$  par l'expression :  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ .

### II-2-8 Symétrie axiale

Dans le cas de 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  $\tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}$  ainsi que les composantes de la déformation  $\gamma_{r\theta}, \gamma_{\theta z}$  sont supposées nuls. 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 problèmes 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 [20].

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

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}$$

### II-3 Conditions aux limites [4], [24]

A la frontière du domaine global, nous considérons certaines conditions aux limites fréquemment rencontrées. Sur une portion de surface, éventuellement non connexe que les champs doivent satisfaire sur ses frontières.

#### II-3-1 Axe de symétrie

Dans le cas d'un système axisymétrique, le long de l'axe (z), une condition de symétrie axiale doit être appliquée :

$$r = 0 \quad (\text{II.36})$$

#### II-3-2 Isolation magnétique

Cette condition impose le potentiel magnétique nul sur la limite considérée :  $\vec{A} = \vec{0}$  Dans notre modèle, elle est appliquée sur la boîte infinie.

#### II-3-3 Encastrement

Dans certains cas, nous considérons que les pièces à souder sont encastées au niveau de certaines extrémités. C'est-à-dire que le déplacement de ces extrémités est nul.

### II-4 Couplage

Après la formulation mathématique et numérique des phénomènes électromagnétiques et mécaniques, il est nécessaire de les coupler afin de mettre en place un modèle complet plus près de la réalité permettant la simulation des systèmes de soudage magnétique. Le couplage peut être faible, c'est à dire que les différents systèmes d'équations sont résolus séparément en un processus itératif. Cependant, le couplage fort nécessite la résolution d'un système global à chaque pas de temps.

#### II-4-1 Couplage faible

Le processus de résolution d'un problème de SEM en couplage faible est réalisé selon les étapes suivantes :

- 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, 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.

### II-4-2 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 et 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 puisque le logiciel COMSOL utilisé le permet.

### II-4-3 Termes de couplage

Les termes de couplage sont représentés par les forces qui s'appliquent sur la pièce dont les forces électromagnétiques sont les plus prépondérantes:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \overrightarrow{rot\vec{A}} \quad (II.37)$$

### II-5 Logiciel de résolution

Pour la simulation du processus de soudage magnétique et les différentes applications industrielles de ce mécanisme de formage magnétique, nous avons utilisé le logiciel **COMSOL Multiphysics**. C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol» qui est fondée en 1986 [28]. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil. Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde.

COMSOL MULTIPHYSICS est un logiciel de simulation polyvalent pour la modélisation de dispositifs et de procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche scientifique. Le produit plate-forme peut être utilisé seul ou enrichi de fonctionnalités issues de n'importe quelle combinaison de modules complémentaires pour simuler l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, la mécanique des fluides, le transfert thermique et le génie chimique [28].

La notion de multi physique est représentée dans la combinaison de plusieurs phénomènes physiques lors de la description d'un processus. COMSOL MULTIPHYSICS offre un couplage des différentes formulations physiques simples. Le résultat comporte des équations qui peuvent être résolues dans une formulation entièrement couplée.

Le choix du logiciel COMSOL est pertinent du fait qu'il est reconnu comme robuste pour ses calculs, qu'il soit de plus en plus utilisé dans l'industrie et que la littérature témoigne que des équipes de recherche travaillent à l'aide de ce logiciel pour simuler plusieurs processus multi physiques mettant en jeu différents phénomènes de nature différente [29]. Il est caractérisé par une discrétisation éléments finis des équations différentielles et la résolution du système global entièrement couplé.

Par contre, le logiciel COMSOL n'écrit pas de fichiers de sortie, ni de résolution ; tout se passe dans un même fichier. Ainsi, après une résolution, seul le fichier « **.mph** » est conservé, fichier qui tend à devenir très lourd [21].



## **Conclusion**

L'objet de ce présent chapitre est le développement et la présentation des modèles mathématiques et numériques concernant les phénomènes physiques, électromagnétiques et mécaniques mis en jeu lors de tout processus de soudage électromagnétique.

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

Différentes applications concernant différentes installations industrielles du soudage magnétique (Soudage de plaques – Soudage de tubes) avec l'analyse des différentes conditions de travail, feront l'objet du chapitre suivant.

---

## *CHAPTER III*

---

---

### *Applications du SEM*

---

## Chapitre III

### Applications du SEM

#### Introduction

Les modèles développés, dans le chapitre précédent, sont validés pour différents dispositifs de soudage magnétique, permettant l'étude des phénomènes physiques mis en jeu et l'analyse de toutes les grandeurs électriques et mécaniques. Dans certains cas, des études paramétriques sont menées pour analyser l'effet de certains paramètres géométriques et physiques des installations industrielles simulées.

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

#### III-1 Soudage des plaques

La première application de soudage est celle qui concerne le SEM des plaques, où il s'agit de souder deux plaques plates parallèles, dont l'une est mobile et se déforme durant le soudage, et l'autre est maintenue fixe.

Notre premier dispositif de magnétosoudage est destiné au soudage des plaques (Figure III-1), dont les paramètres sont regroupés dans le tableau III-1. Les plaques dans cette application sont de mêmes dimensions (11.5mm x 0.5mm x 11.5 mm), avec un inducteur massif de même forme de dimensions (4.5mm x 0.5mm x 11.5mm).

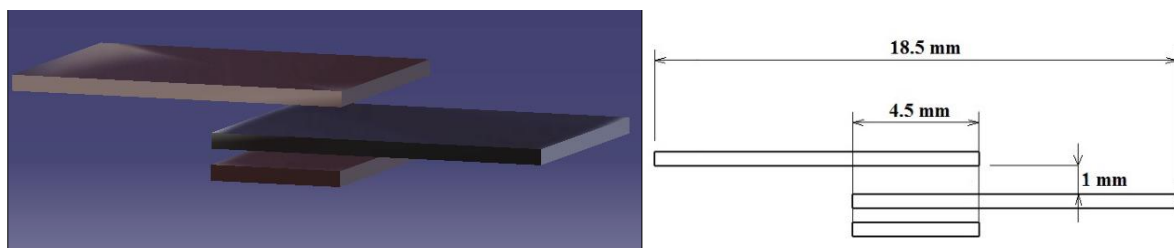


Figure III-1: Installation et géométrie du système de soudage des plaques

Tableau III-1: Paramètres du système de soudage de plaques

		Al	Cu	Ti
Propriétés physiques des plaques soudées et de l'inducteur	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	8700	4940
	Conductivité électrique [S/m]	3.774 e <sup>7</sup>	5.998 e <sup>7</sup>	7.407 e <sup>5</sup>
	Module de Young [Pa]	70e9	110e9	105e9
	Coefficient de Poisson	0.33	0.35	0.33

### III-1-1 Soudage de plaques similaires Al-Al

Le cas le plus simple de l'application du SEM de plaques est celle utilisant deux plaques similaires (Al-Al). L'inducteur massif, en cuivre, délivre un courant de décharge de forme sinusoïdale amortie représenté sur la figure (Figure III-2(a)).

$$J_{\varphi} = 3.2e^{11} * \exp(-3e^4 * t) * \sin(1.45e^5 * t) \quad (\text{III.1})$$

Le maillage éléments finis (Figure III-2 (b)), utilisé pour cette application, est un maillage 2D triangulaire, affiné deux fois, comportant 4916 éléments et 2522 nœuds.

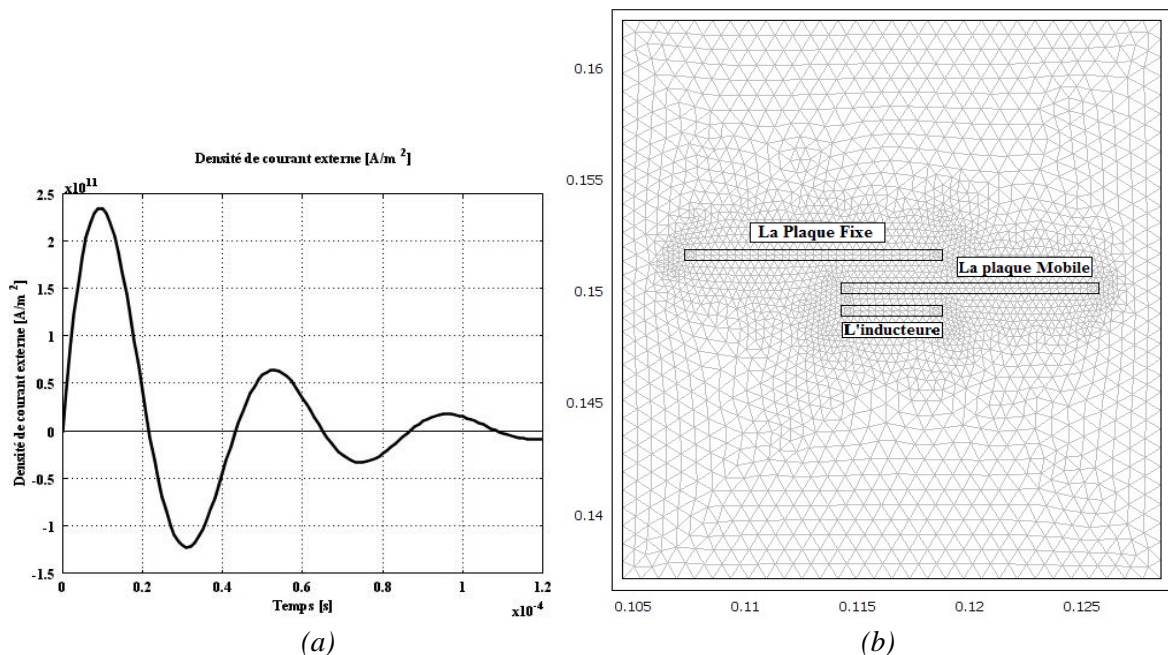


Figure III-2: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage utilisé

D'après les résultats numériques obtenus, nous pouvons remarquer, à partir de la distribution de la densité de courant induite le long de la plaque déformée à l'instant final de soudage à  $t = 10 \mu\text{s}$  (Figure III-3(a)), et la densité de courant induite au milieu de la plaque, pendant la durée de soudage (Figure III-3(b)), des formes tout à fait prévisibles. D'une part, le fait que le courant induit est opposé

au courant inducteur, selon la loi de Lenz. D'autre part, le courant induit augmente avec le temps et il est maximal dans les régions de la plaque en face de l'inducteur.

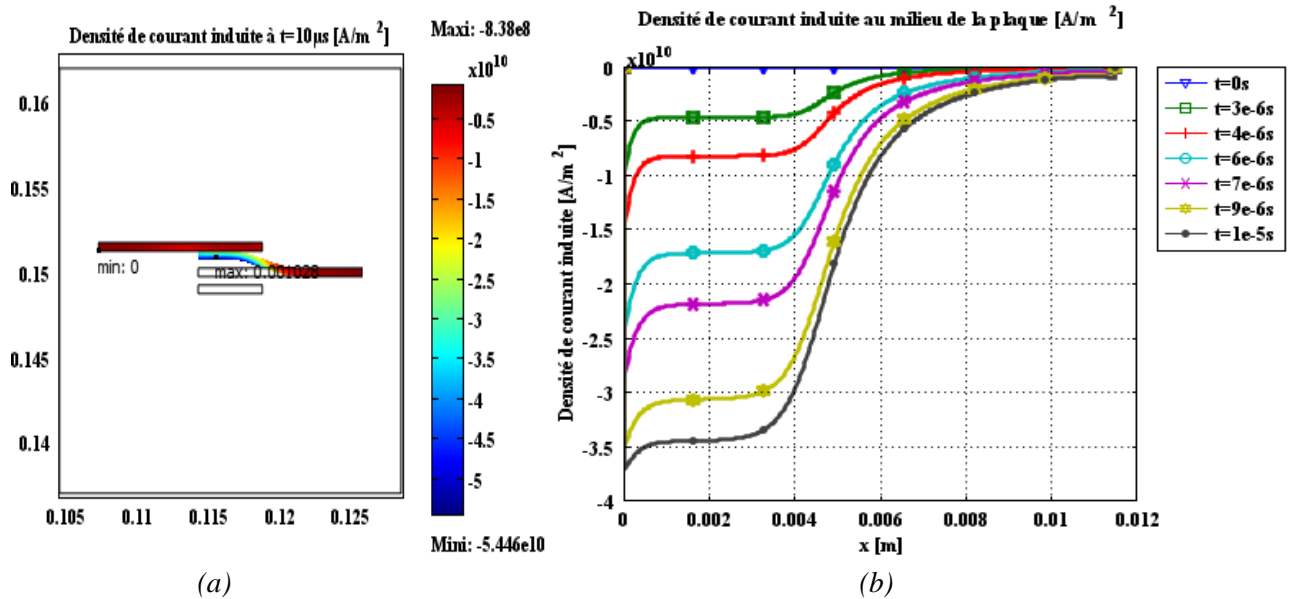


Figure III-3: Densité de courant induite (a) Distribution de la densité de courant induite le long de la plaque à souder au temps final  $t=10\mu s$  (b) La densité de courant induit au milieu de la plaque en fonction de largeur de la plaque  $x$  [m]

Pour ce qu'est de la force de Lorentz au milieu de la plaque, ses distributions sont montrées sur les figures (Figure III-4). Elles sont proportionnelles à celles du courant induit, puisqu'elles sont les conséquences de l'interaction entre les deux courants, inducteur et induit. Donc elles sont théoriquement prévisibles.

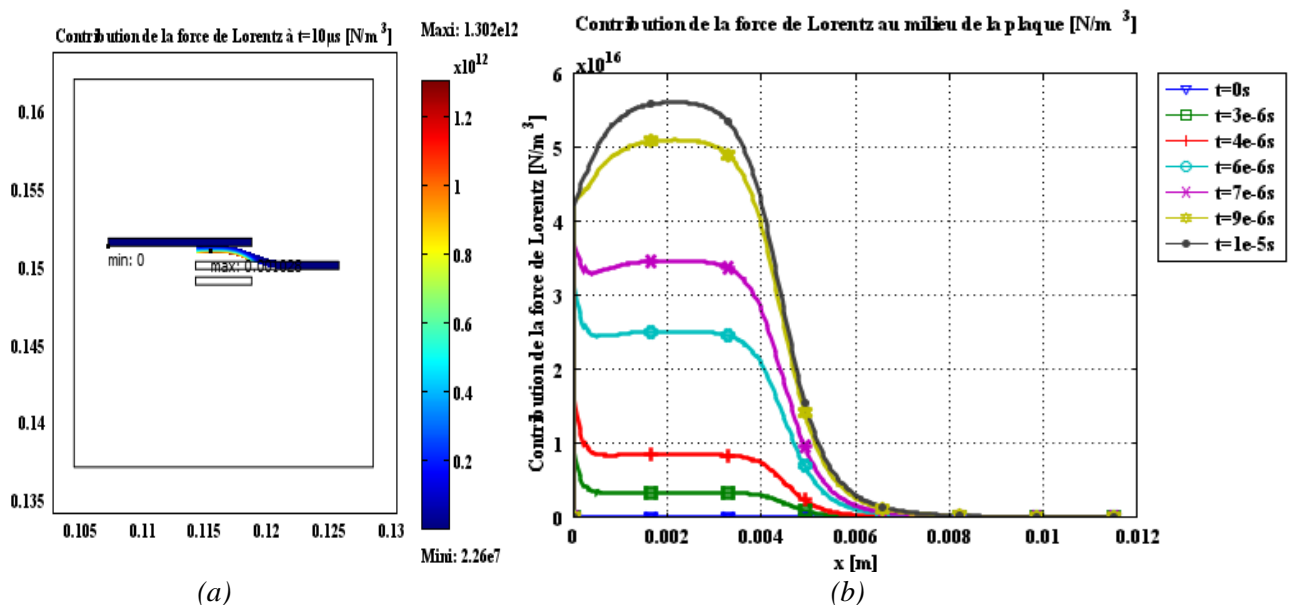


Figure III-4: (a) Distribution de la force de Lorentz dans le système au  $t=10\mu s$  ; (b) Force de Lorentz au milieu de la plaque durant la période de soudage

La figure (Figure III-5(a)), représentant la déformation de la plaque calculée numériquement, montre un soudage presque uniforme dans la région en face de l'inducteur ce qu'est logique. Cette forme finale est prévisible et reflète bien la distribution des forces de Lorentz appliquées sur la plaque à souder.

L'évolution temporelle de la déformation de la plaque, montrée sur la figure (Figure III-5(b)), met en évidence la progression du soudage, dans le temps et nous fait remarquer que la déformation n'est significative qu'à partir de  $t = 6 \mu\text{s}$  est devient rapide, donnant le soudage final à  $t = 10 \mu\text{s}$ .

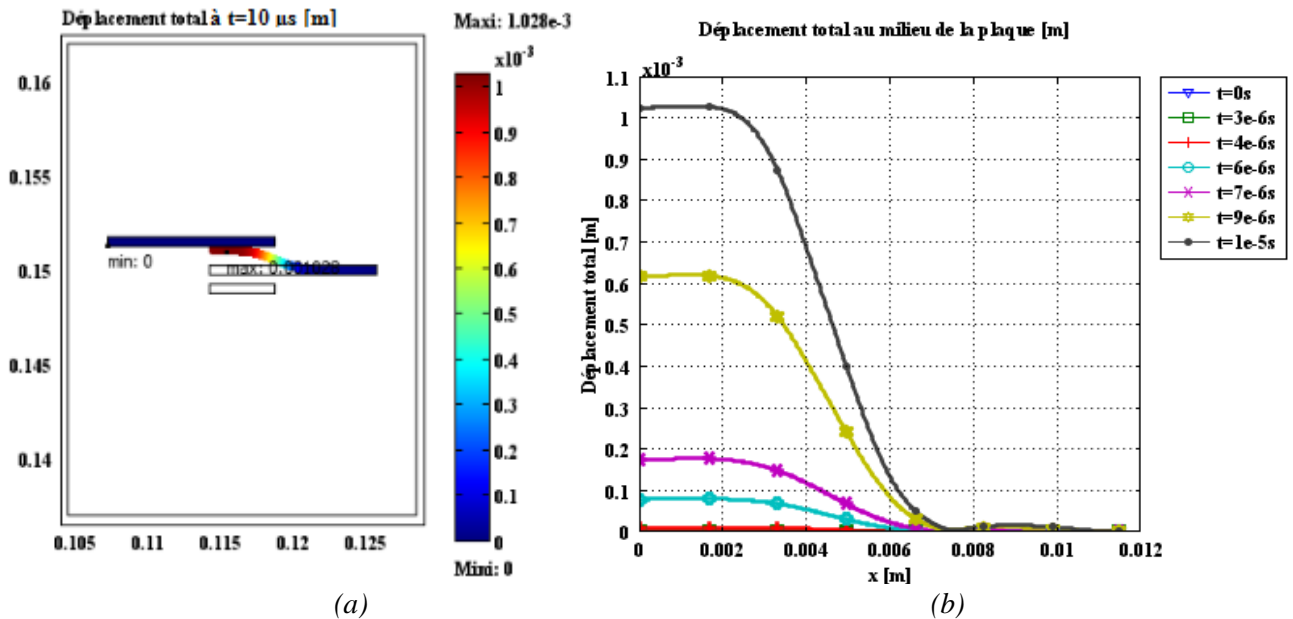


Figure III-5: Soudage des plaques dissimilaires (a) Soudage des plaques Al-Al à  $t= 10 \mu\text{s}$  ; (b) l'évolution temporelle de la déformation au milieu de la plaque le long de la durée du soudage Al-Al

### III-1-2 Soudage de plaques dissimilaires

Dans cette deuxième application, nous avons utilisé en plus de l'aluminium deux différents couples de matériaux qui sont (Cu-Al, et Ti-Al) avec les mêmes conditions de soudage, dont les paramètres sont donnés dans le (Tableau III-1). Nous avons analysé l'influence de la nature du métal sur les autres paramètres de soudage à savoir (comme dans l'application précédente) : le temps de soudage, le courant de décharge et la déformation totale de la plaque.

#### III-1-2-1 Soudage avec la même densité de courant inducteur

En considérant le même courant inducteur donné par la relation (III-1) et représenté sur la figure (Figure III-2 (a)), le soudage dissimilaire montre des comportements différents, pour les différents couples de plaques (Al-Al, Cu-Al, et Ti-Al) en termes d'évolution temporelle de la déformation, de temps total de soudage, et de la forme finale de la plaque, une fois elle est soudée (Figures III-5, III-6, III-7).

D'autre part, nous pouvons remarquer que les grandeurs physiques, en particulier, les courants induits et les forces électromagnétiques, sont plus importantes dans le cas de la plaque en Titanium que celle en cuivre (Figure III-8).

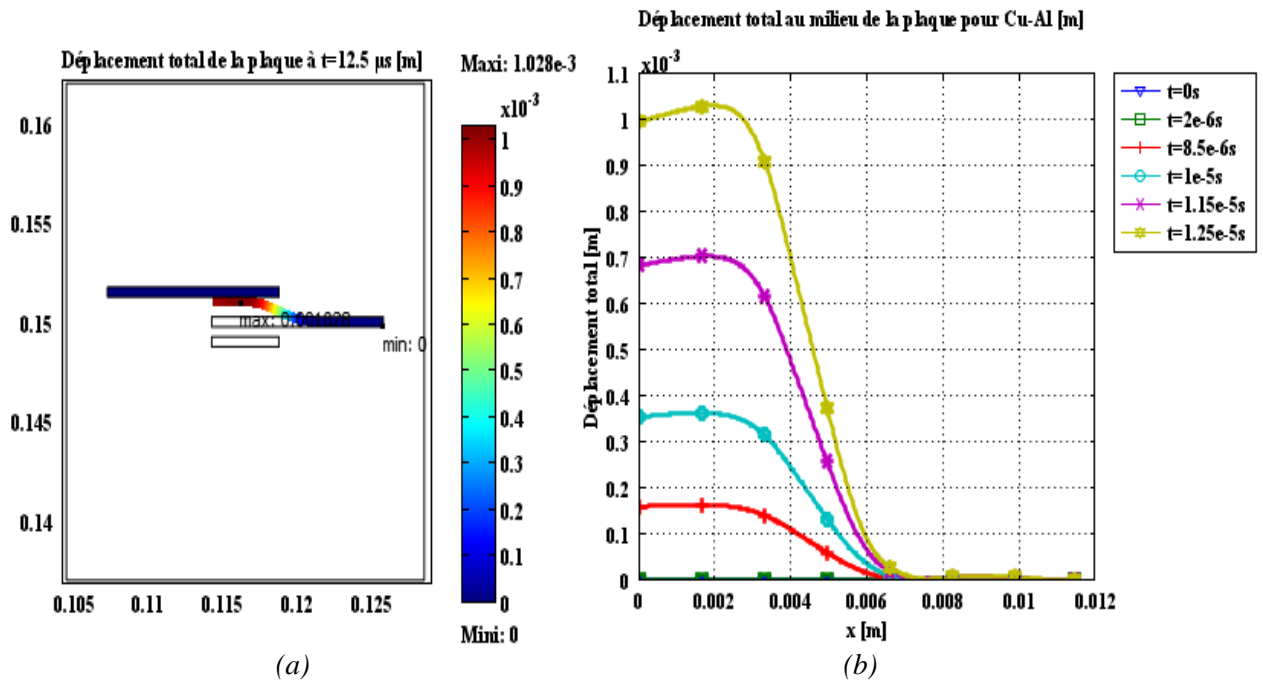


Figure III-6: (a) Soudage Cu-Al à l'instant final  $t= 12.5 \mu s$  ; (b) Évolution temporelle de la déformation totale au milieu de la plaque durant la durée du soudage Cu-Al

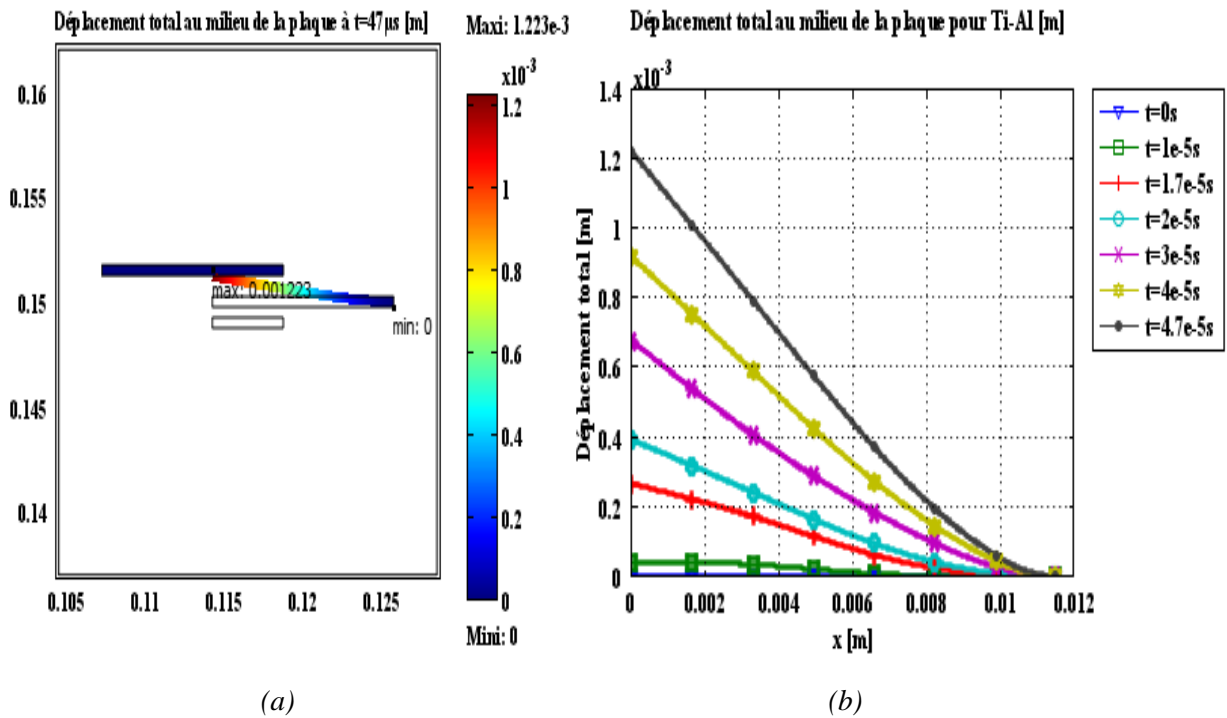


Figure III-7: (a) le soudage Ti-Al à l'instant final  $t= 47 \mu s$  ; (b) L'évolution temporelle de la déformation totale au milieu de la plaque durant la durée du soudage Ti-Al

La comparaison des résultats numériques, permet de conclure que, pour le soudage dissimilaire, la meilleure paire de matériaux, en termes de rapidité et d'économie d'énergie électrique, est celle du Cu-Al (Figure III-8-9-10). Cependant, le meilleur soudage, le plus rapide et le plus performant est celui utilisant les deux plaques similaires en Aluminium (Al-Al). Cela justifie l'utilisation remarquable de ce métal dans les différentes applications industrielles du soudage électromagnétique, puisqu'il présente une soudabilité plus intéressante.

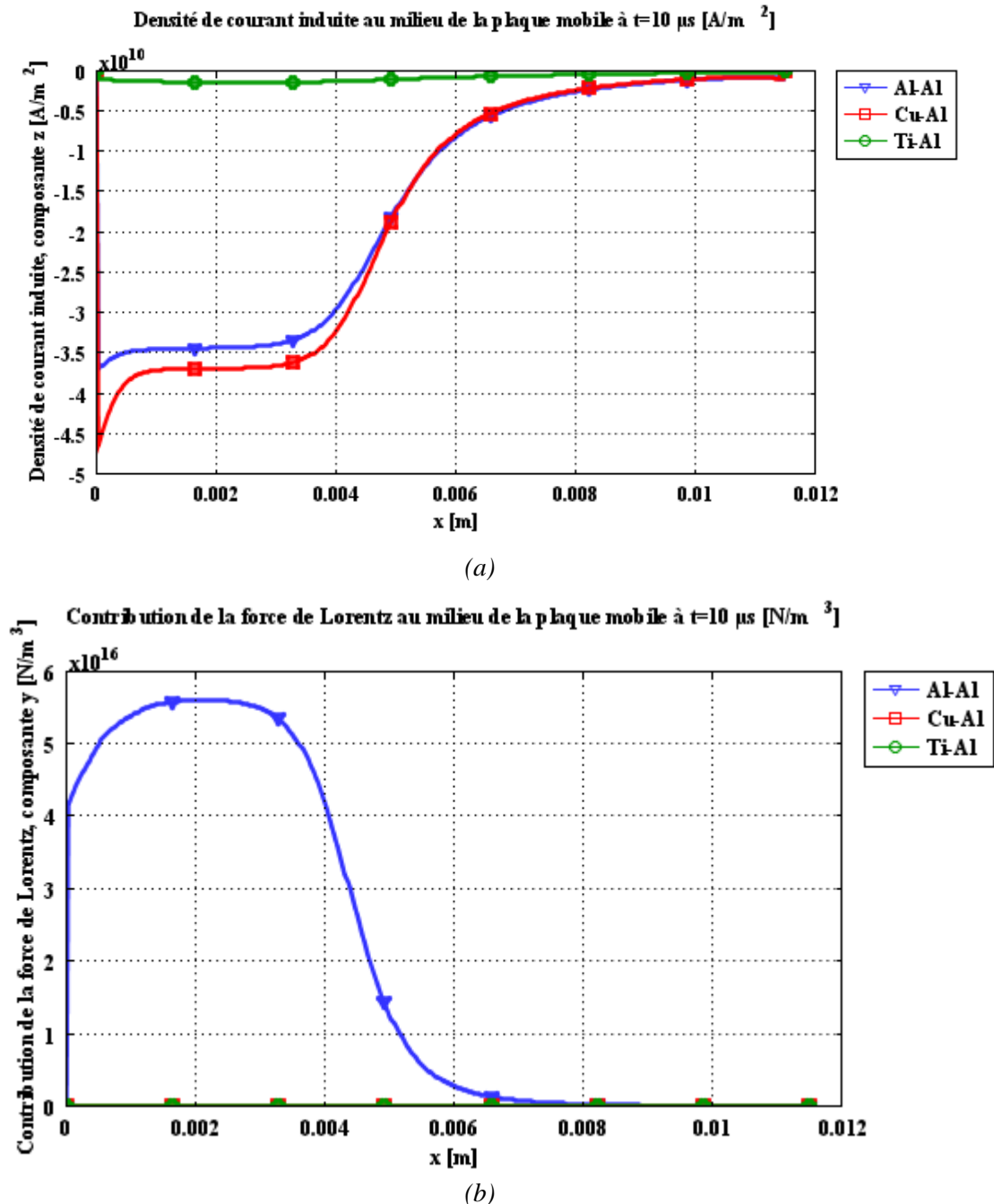


Figure III-8: (a) Distribution de la densité de courant induite; (b) Distribution de la force de Lorentz le long des différentes plaques à souder à  $t=10 \mu\text{s}$



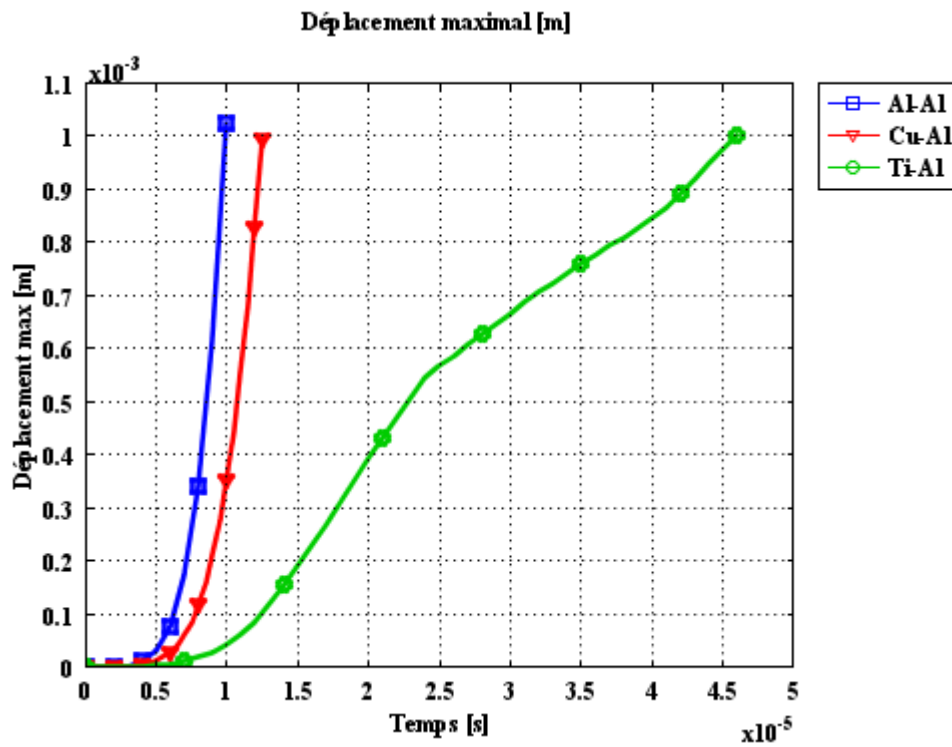


Figure III-9: Déplacement maximal de la plaque à souder pour les différents couples de matériaux

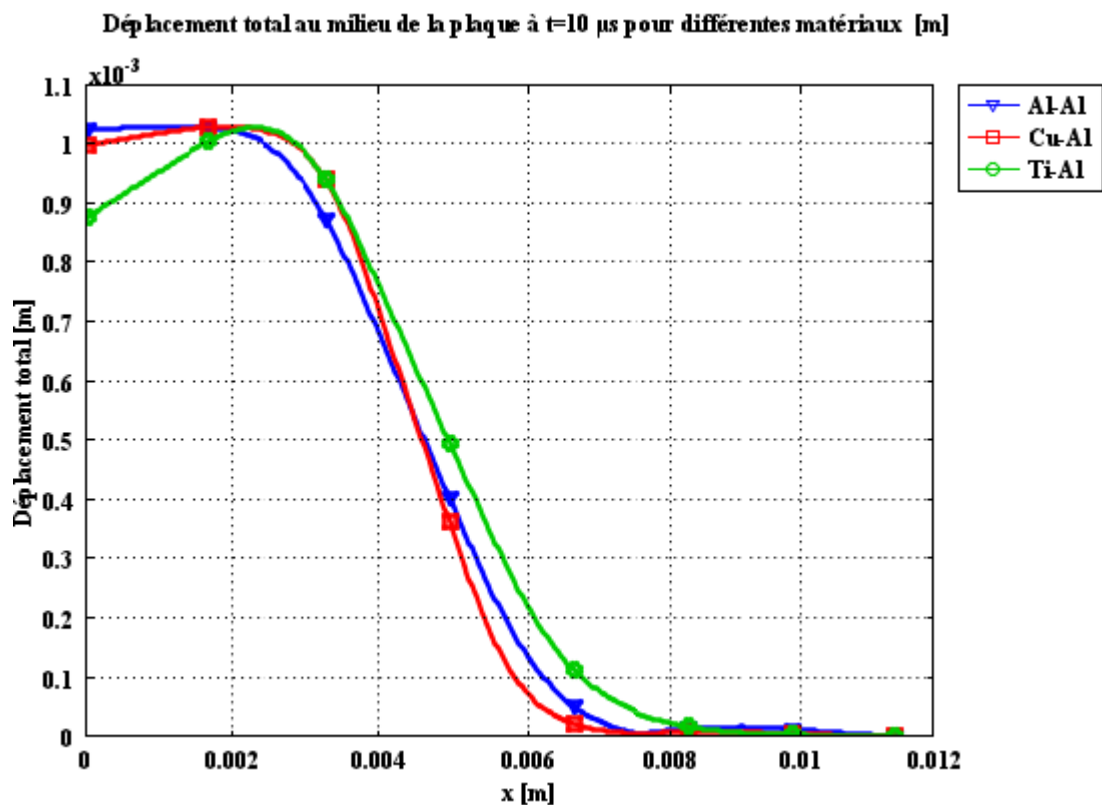


Figure III-10: La déformation au milieu de la plaque à  $t=10 \mu s$ , pour différents couples de matériaux

**III-1-2-2 Soudage avec des densités de courant inducteur différentes**

Maintenant et afin d'examiner l'effet du type de matériaux de la plaque sur le temps de soudage, nous considérons le même temps de soudage ( $t = 10 \mu s$ ) avec les mêmes autres paramètres, sauf que pour chaque application nous multiplions le courant de décharge avec un facteur (Tableau III-2), pour obtenir le même soudage dans les différentes plaques ( $d_{max} = 1 \text{ mm}$ ) et avec un même temps final ( $t = 10 \mu s$ ), la figure (Figure III-11) montre une comparaison des densités de courant de décharge pour chaque cas.

Tableau III-2: Les différents courants de décharge

	Le courant de décharge
Al-Al	$J_\phi$
Cu-Al	$J_\phi = J_\phi * 1.7$
Ti-Al	$J_\phi = J_\phi * 5.7$

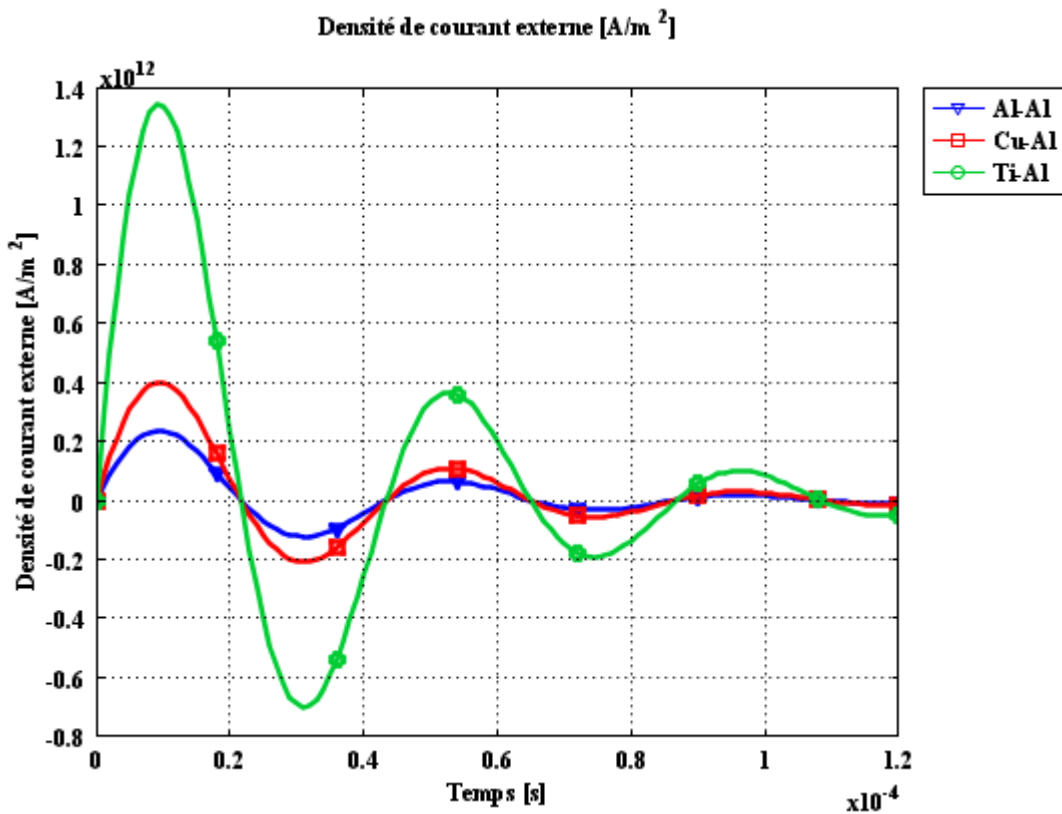


Figure III-11: La variation de densité de courant externe selon le type de matériaux

La distribution des courants induits créée pour les différents matériaux à  $t = 10 \mu\text{s}$  (Figure III-12) montre que le courant induit est parfaitement proportionnel à la conductivité de la pièce à souder et par conséquent, les courants induits les plus importants sont créés au niveau du cuivre. Cependant, ce dernier présente de mauvaises propriétés mécaniques, ce qui explique le taux de sa déformation, qui est plus faible que celui du cuivre (Figure III-13).

Nous pouvons conclure alors que toutes les grandeurs étudiées sont plus importantes dans le cas de l'aluminium et par conséquent, c'est le matériau qui présente une meilleure soudabilité avec le soudage magnétique. Ce qui justifie le fait qu'il est avantagé industriellement et qu'il est très utilisé.

En comparant le cuivre et le titanium, dans le cas de soudage dissimilaire, nous pouvons classer le cuivre, présentant le meilleur soudage par rapport au titanium.

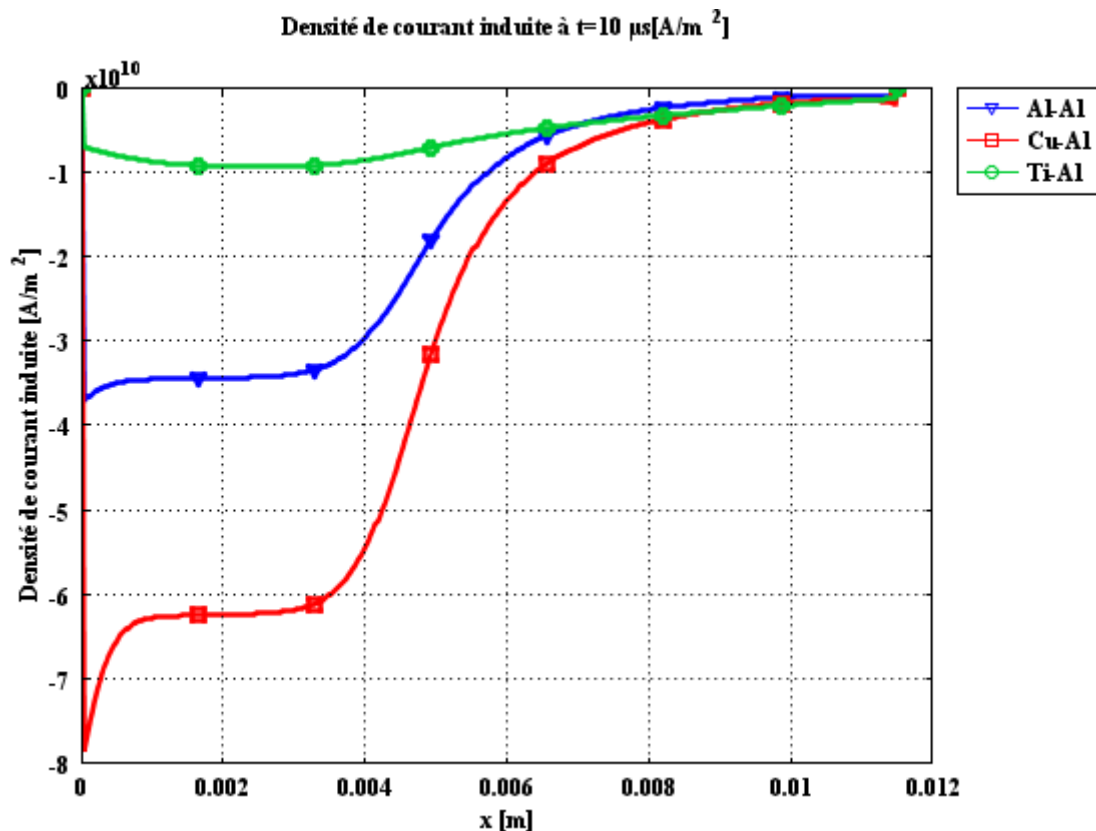


Figure III-12: Densité de courant induit le long de la plaque pour les différents matériaux à  $t=10 \mu\text{s}$

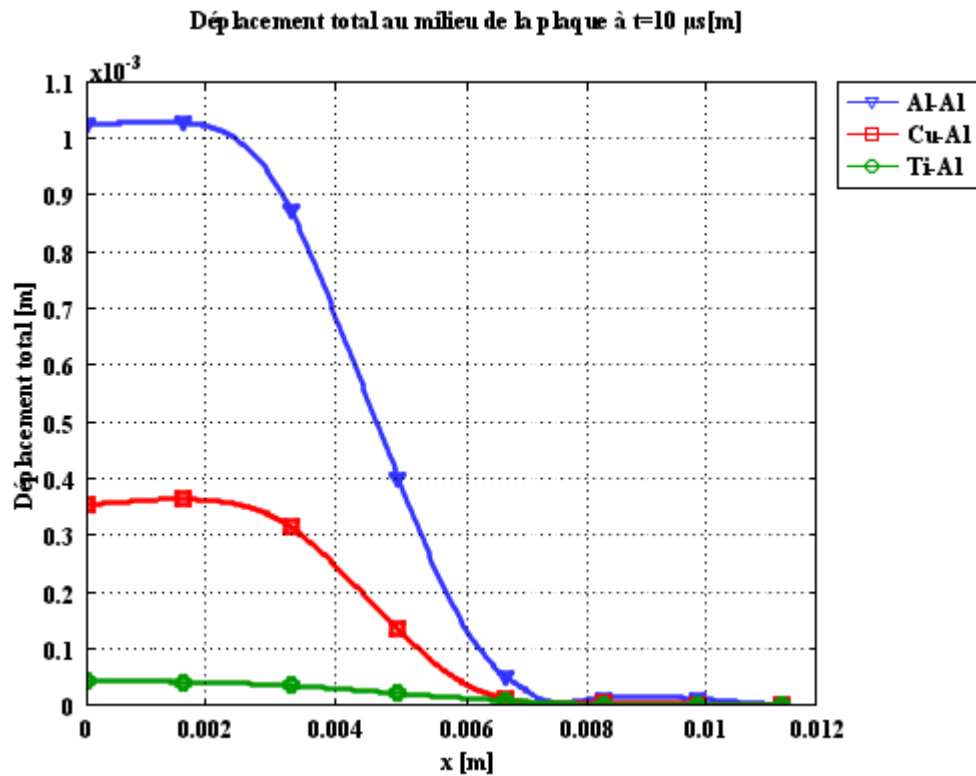


Figure III-13: Le déplacement total au milieu de la plaque à  $t=10 \mu\text{s}$  pour les différents matériaux

## III-2 Soudage des tubes

Le soudage des tubes occupe une grande partie dans les industries modernes telles que l'aérospatiale, l'industrie pétrolière, l'industrie des gaz et fluides ...etc. Pour cela, nous avons tenu à simuler des applications de soudage électromagnétique des tubes, en analysant différents paramètres physiques et géométriques de ces installations.

### III-2-1 Soudage des tubes avec inducteur central

Cette installation de soudage de tubes comporte deux tubes concentriques, de mêmes dimensions, distants de quelques millimètres (2.5mm) dont le tube interne est fixe et le tube externe est mobile : c'est le tube à souder. Le système est identique à celui utilisé dans la référence [27].

Cette opération de soudage de tubes est celle de la compression du tube extérieure, pour laquelle, l'inducteur est introduit à l'extérieur et centré par rapport aux deux tubes à souder. Le soudage est obtenu par déformation du tube extérieur sur le tube intérieur.

A cause de la symétrie axiale, la moitié de la géométrie est considérée (Figure III-14).

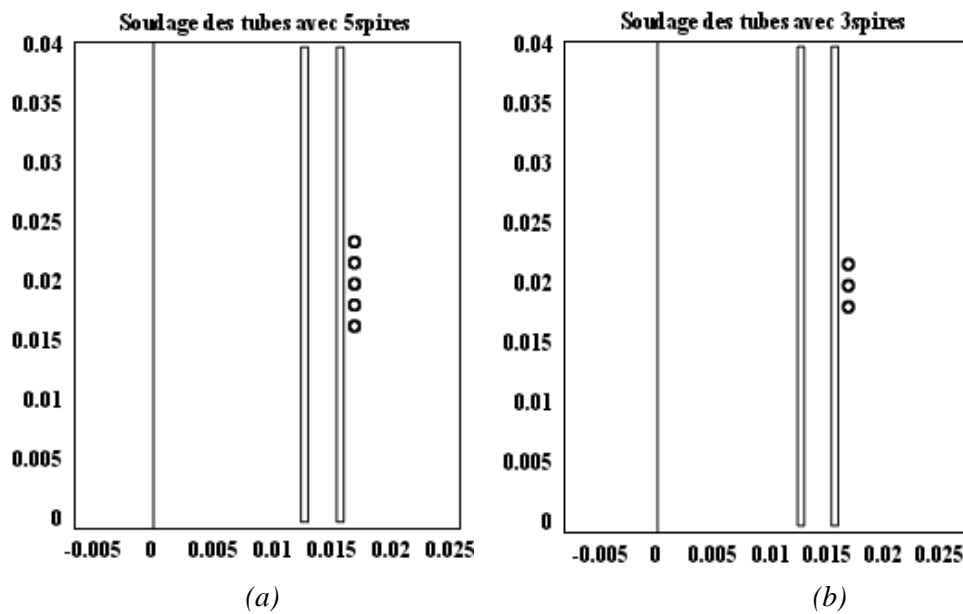


Figure III-14: Géométrie du système; (a) avec inducteur de 5spires. (b) avec inducteur de 3spires

Dans cette application, deux inducteurs différents sont considérés (5 spires et 3spires), parcourus par un courant de décharge de forme sinusoïdale amortie exprimé par l'équation (III- 2) et présenté sur la figure (Figure III-15).

Une étude paramétrique a été menée afin de mettre en évidence l'influence de certains paramètres géométriques et physiques de l'installation de soudage sur le comportement du tube à souder.

$$J_{\varphi} = 13.9e^{10} * \exp(-6372.79 * t) * \sin(1.1180e5 * t) \tag{III-2}$$

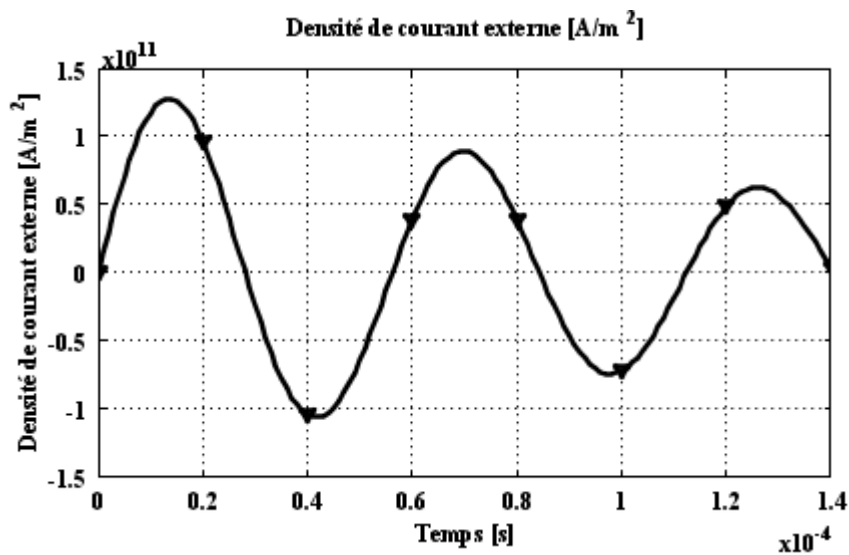


Figure III-15: Densité de courant de décharge

**III-2-1-1 Effet de la nature du matériau du tube à souder**

Pour effectuer une analyse comparative, nous avons utilisé plusieurs matériaux du tube à souder, dont les paramètres sont présentés dans le tableau suivant:

*Tableau III-3: Propriétés physiques des matériaux*

		Al	Cu	Mg
Les propriétés des plaques soudées et de l'inducteur	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	8700	1770
	Conductivité [S/m]	3.774e7	5.998e7	1.087e7
	Perméabilité relative	1	1	1
	Module de Young [Pa]	70e9	110e9	45e9
	Coefficient de Poisson	0.33	0.35	0.35

D'après les figures (Figures III-16-17-18-19), il est bien clair, qu'au bout de 20 $\mu$ s, le soudage est obtenu pour le tube en Aluminium. Cependant, les autres matériaux présentent une déformation faible et demandent plus de temps de soudage.

Nous pouvons conclure que le meilleur et le plus rapide soudage est celui de l'aluminium. Par contre, le cuivre présente la plus faible déformation, malgré ses propriétés électriques intéressantes. Cela revient au comportement mécanique différent des matériaux qui dépend fortement des paramètres mécaniques, en particulier le module de Young.

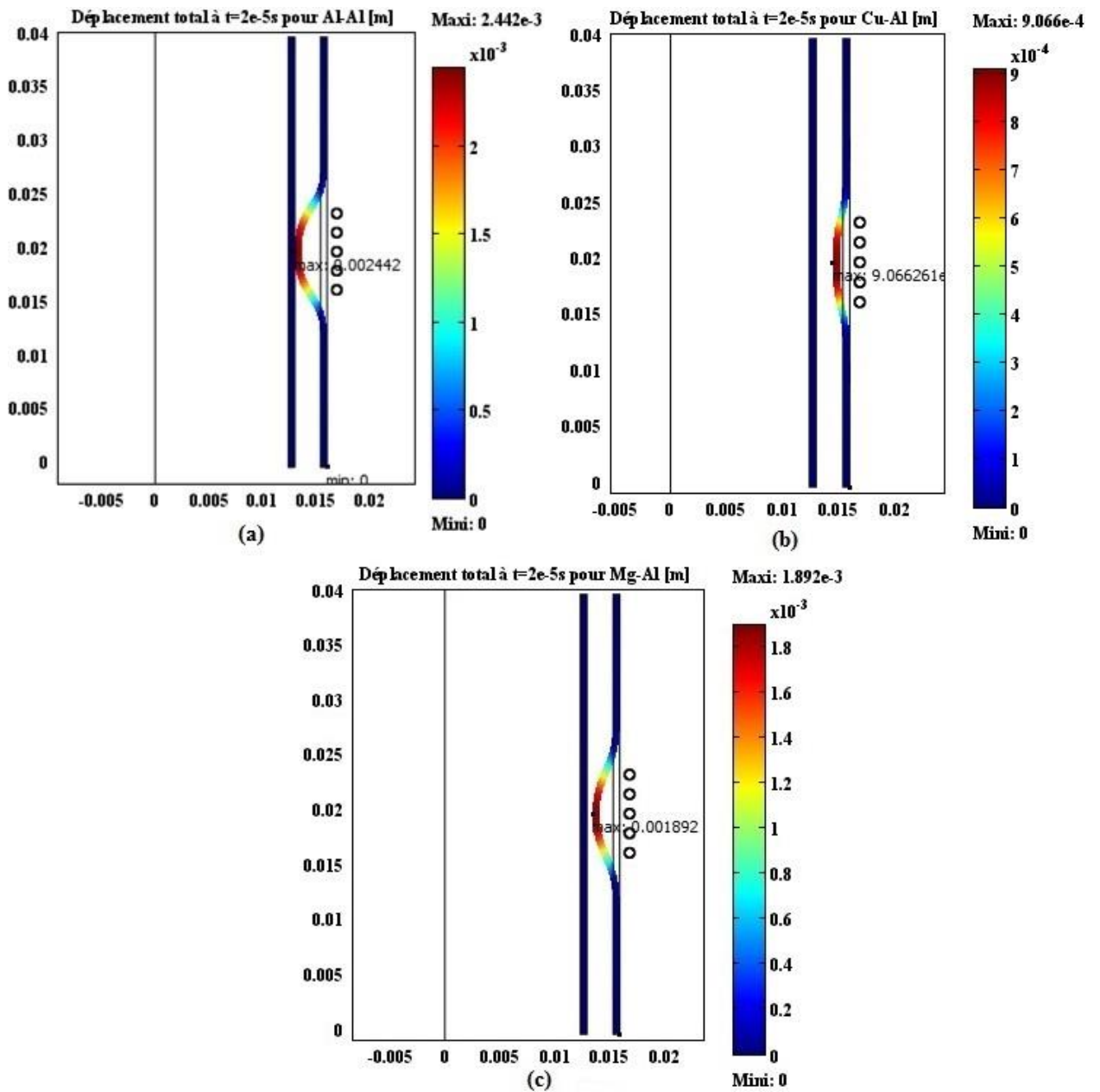


Figure III-16: Soudage à  $t=2e-5s$  pour différents matériaux; (a) Soudage Al-Al; (b) Soudage Cu-Al; (c) Soudage Mg-Al

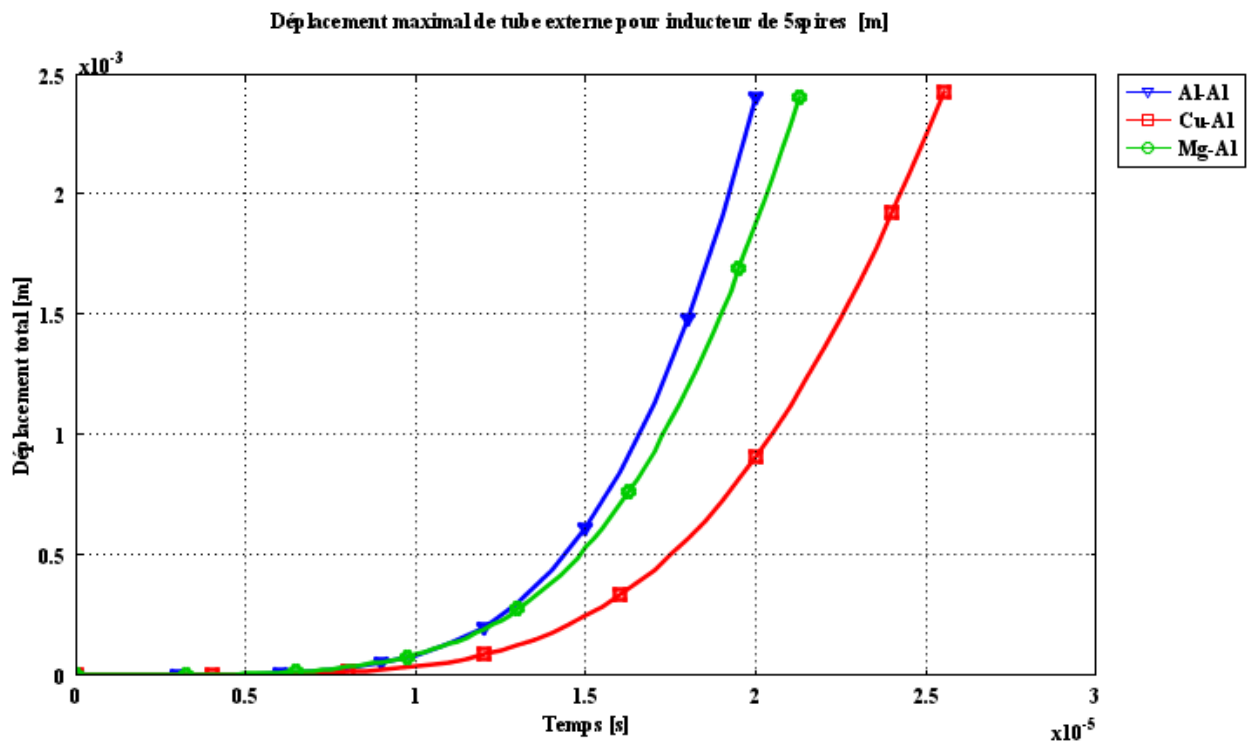


Figure III-17: Déplacement maximal du tube externe (inducteur à 5spires)

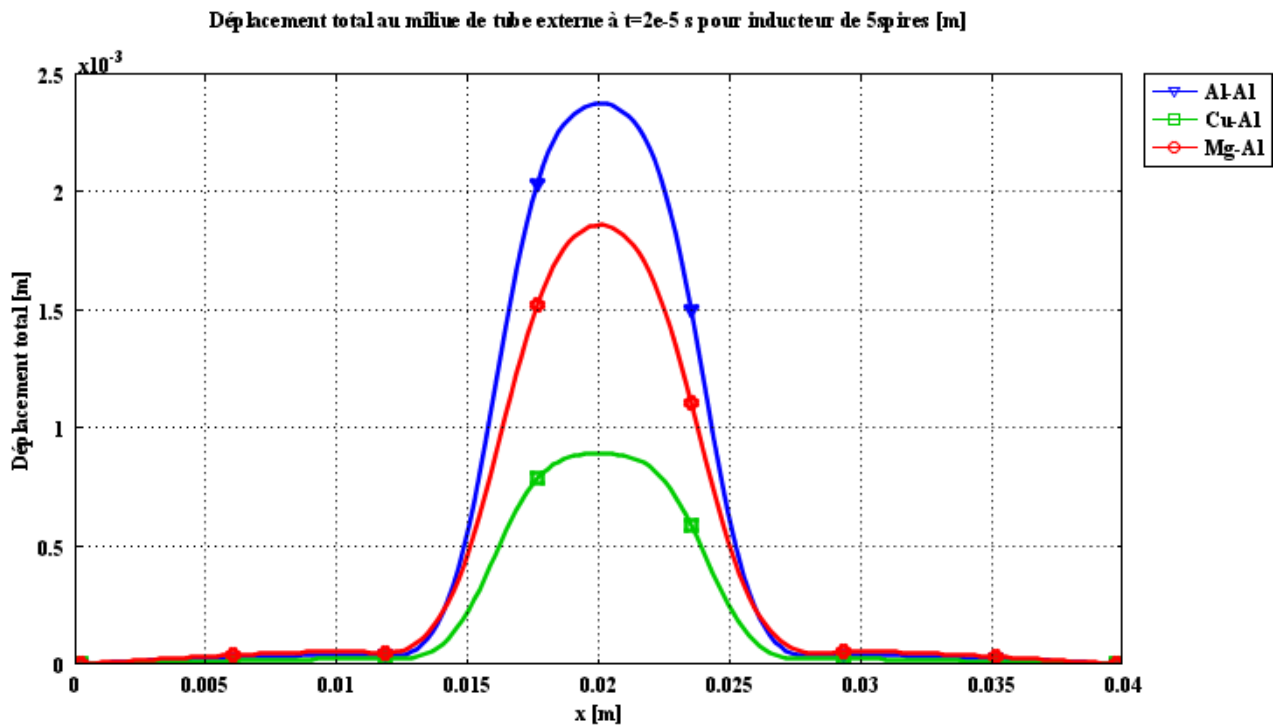


Figure III-18: Déplacement total au milieu de tube externe (inducteur à 5spires)



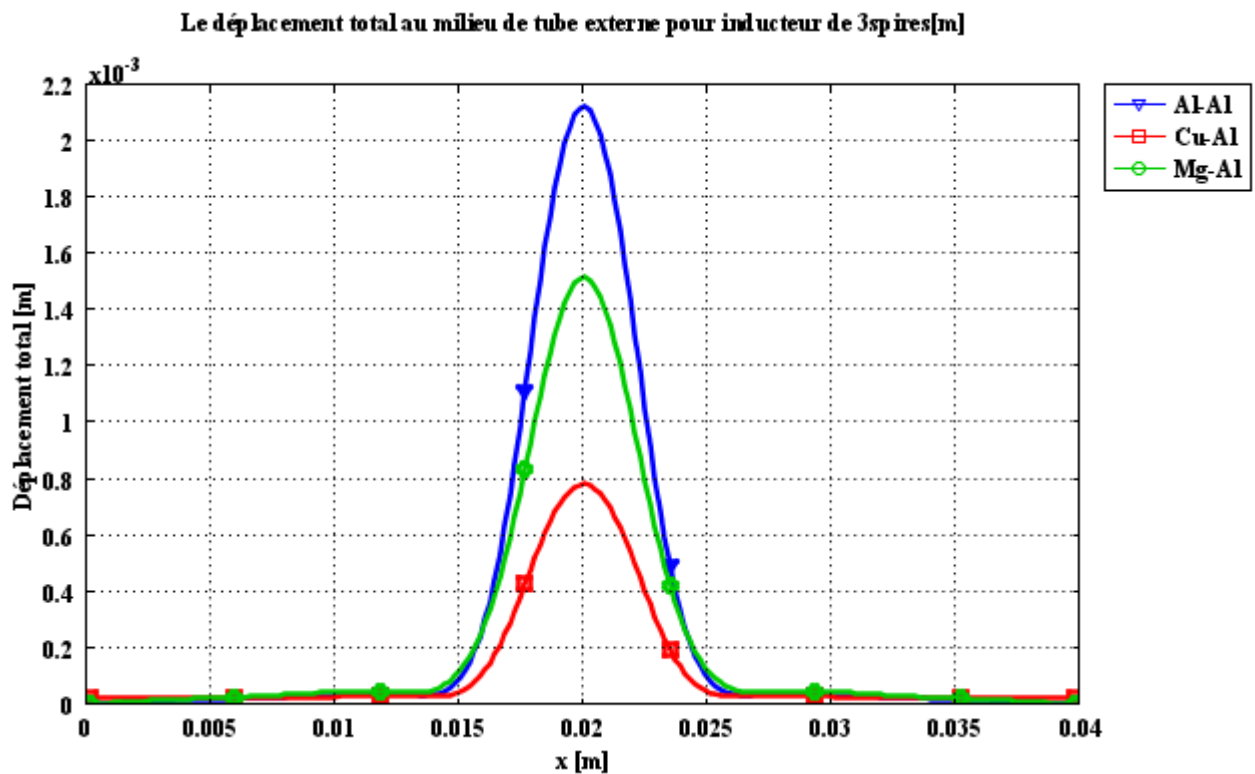


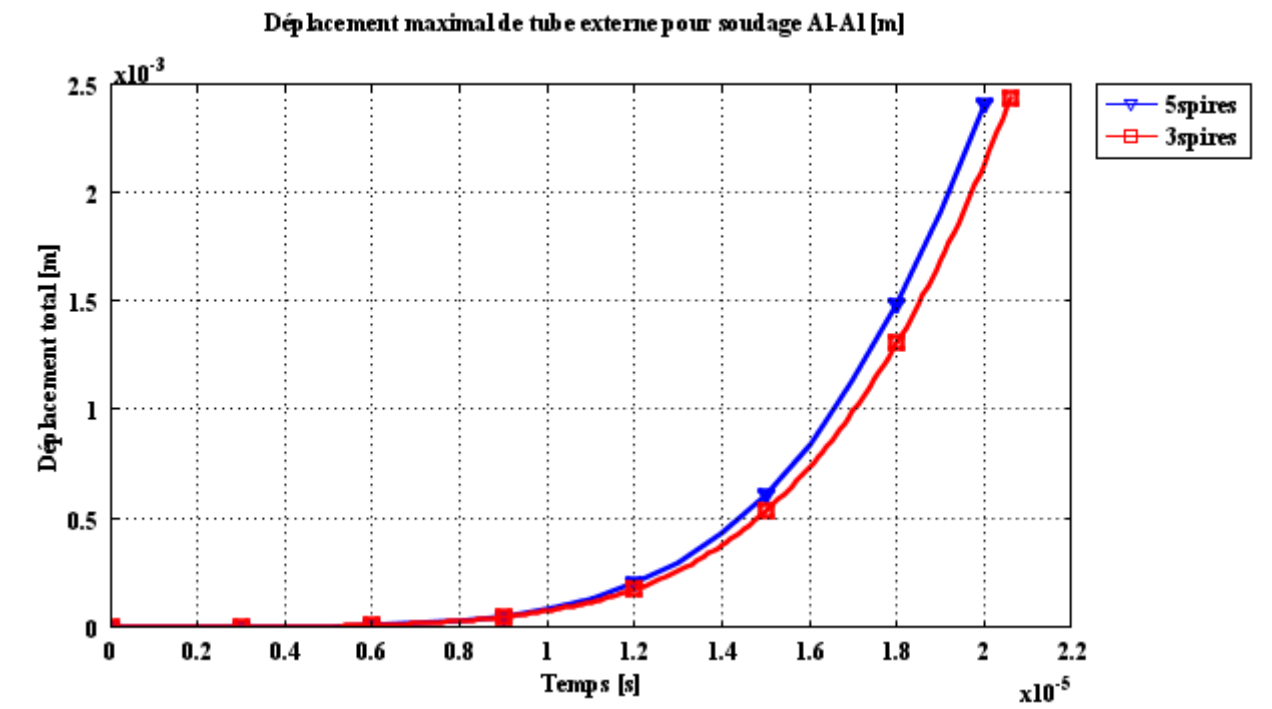
Figure III-19: Déplacement total au milieu de tube externe (inducteur à 3 spires)

### III-2-1-2 Effet du nombre de spires de l'inducteur

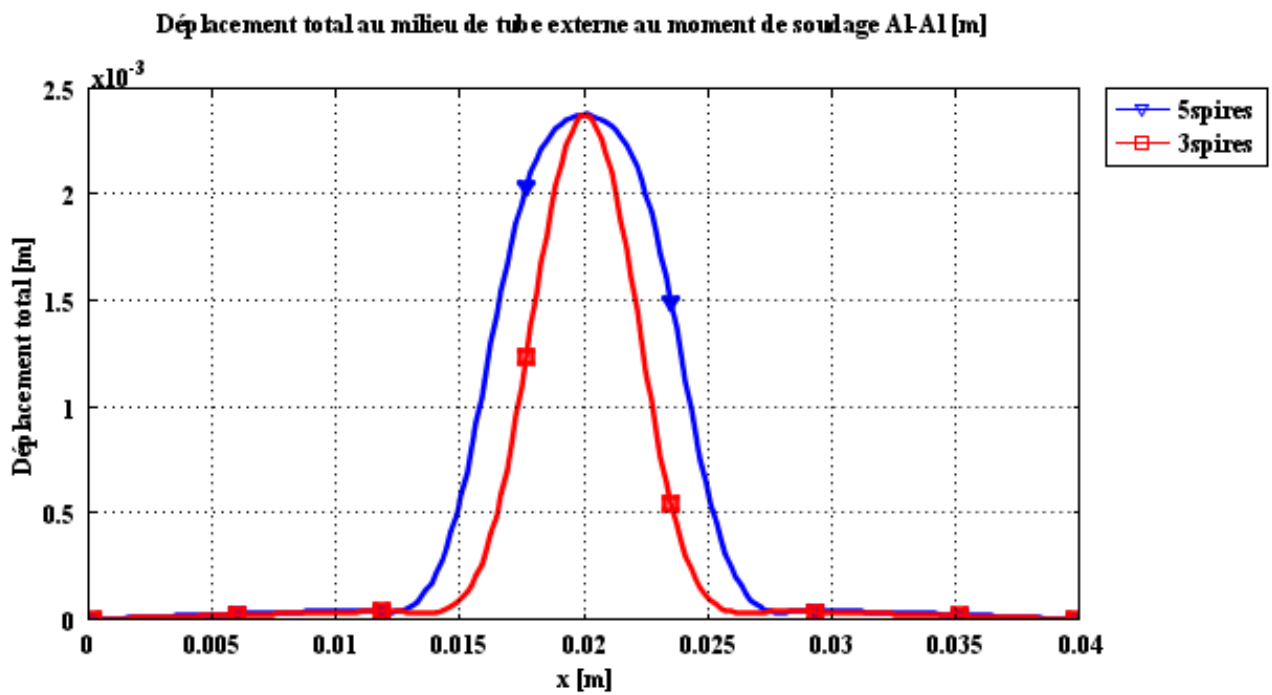
Un autre paramètre à étudier est le nombre de spires de la bobine de soudage. Les résultats numériques sont tout à fait prévisibles (Figures III. 20-21-22).

La déformation finale du tube est proportionnelle au nombre des spires utilisées durant le soudage. Ce comportement est dû au fait que les courants induits et par conséquent les forces de Lorentz s'intensifient relativement avec l'augmentation du nombre des spires.

D'autre part, la forme de la partie soudée dépend fortement de longueur de l'inducteur et donc du nombre de spires de ce dernier (Figures III-20 b, III-21 b et III-22 b).



(a)



(b)

Figure III-20: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Al-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Al-Al

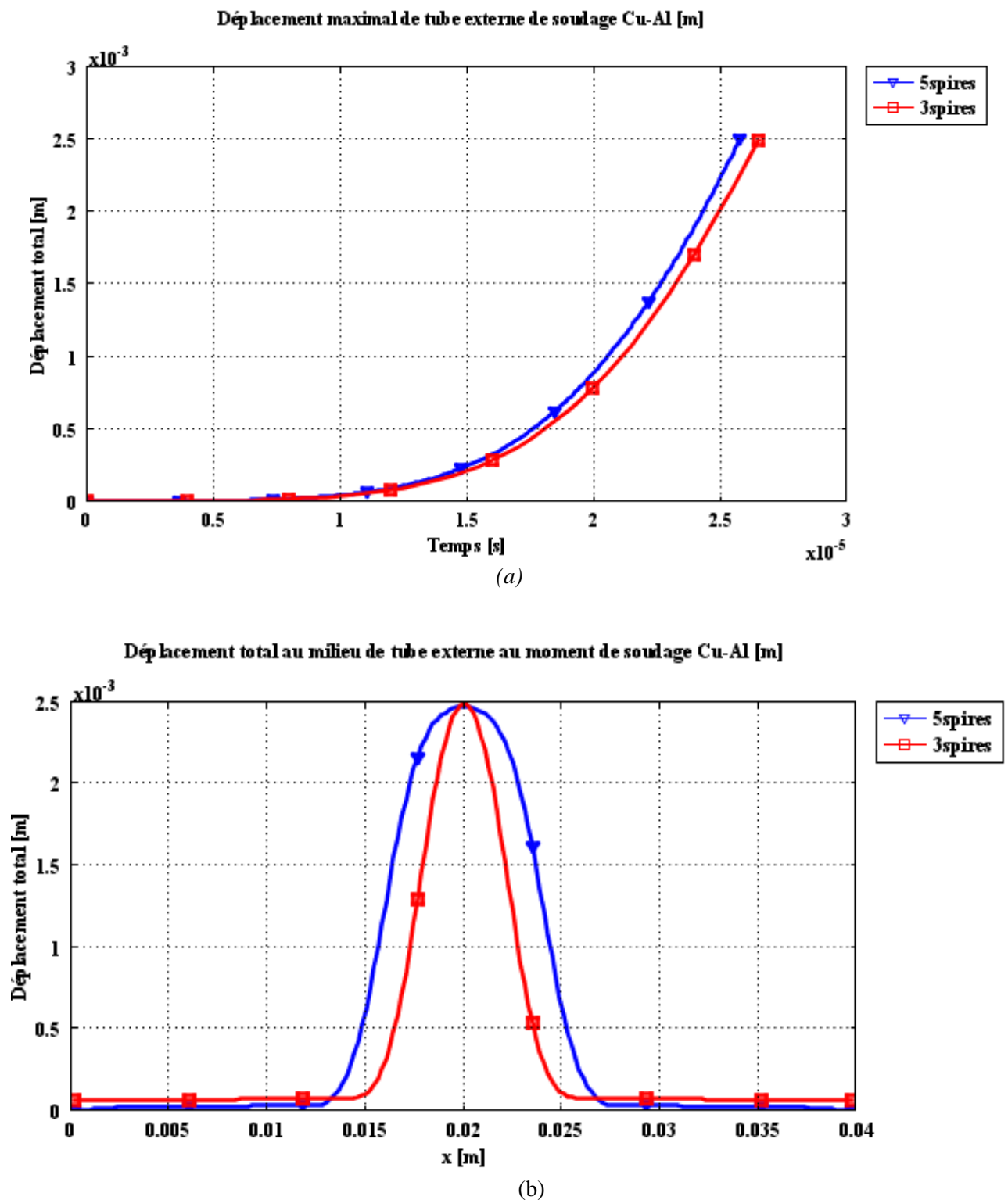


Figure III-21: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Cu-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Cu-Al

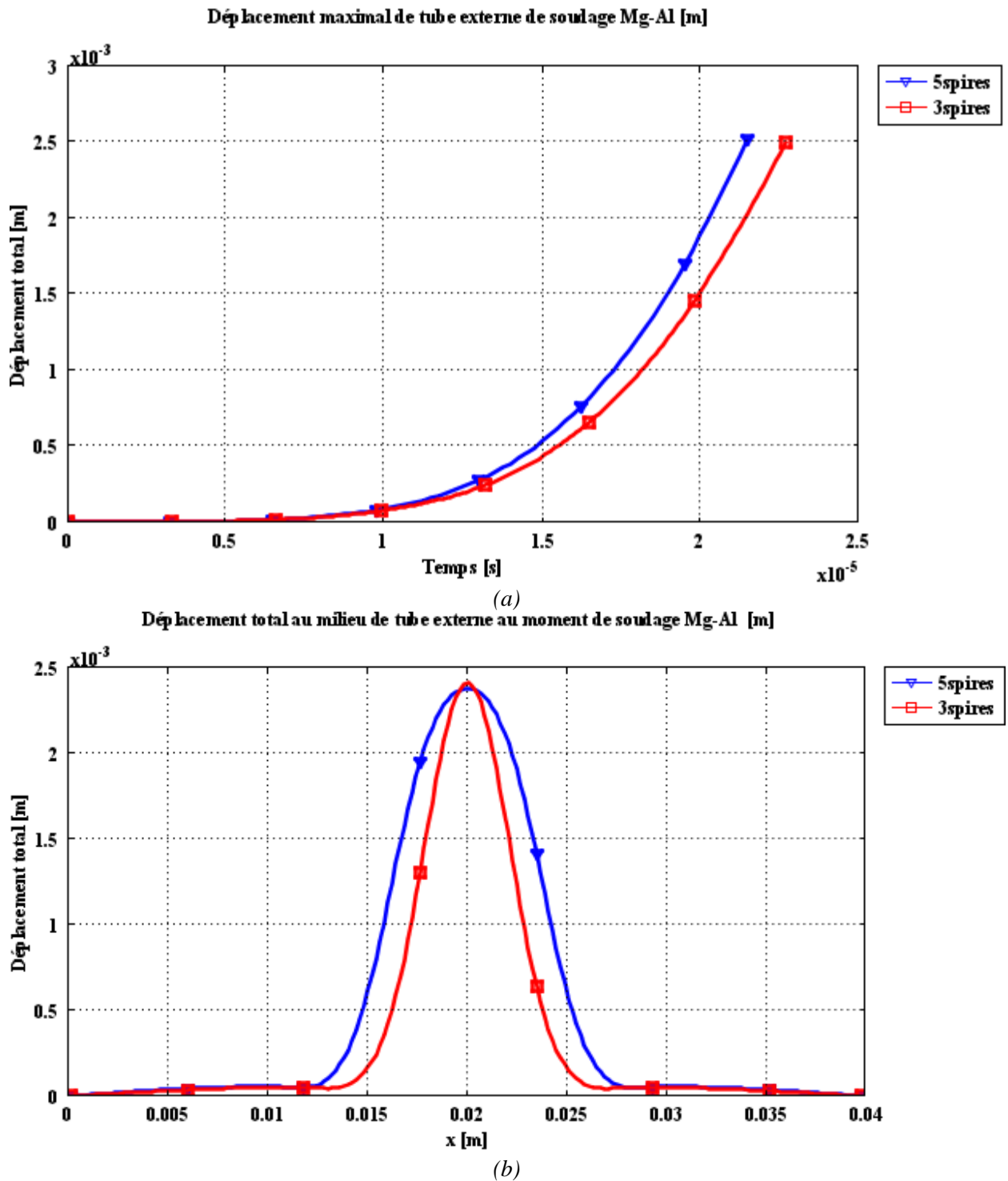


Figure III-22: (a) Déplacement total au milieu de tube externe durant le soudage Mg-Al ; (b) Déplacement maximal de tube externe de soudage Mg-Al

### III-2-2 Soudage des tubes avec inducteur périphérique

Dans une deuxième application de soudage des tubes, nous avons considéré la même géométrie précédente, sauf que l'inducteur n'est plus centré par rapport aux tubes, mais il est positionné à la périphérie (Figure III-23).

Ce positionnement nous permet d'obtenir des géométries spéciales (Figure III-24).

En effet, avec une seule spire périphérique, le soudage obtenu ressemble à un soudage par point (L'effet de pointe est bien visible). Cependant, plus le nombre de spires augmente, plus la largeur de soudage est plus large.

D'autre part, le soudage avec une seule spire est beaucoup plus rapide que les autres cas, où ça nécessite plus de temps pour que le tube extérieur se soude sur le tube intérieur.

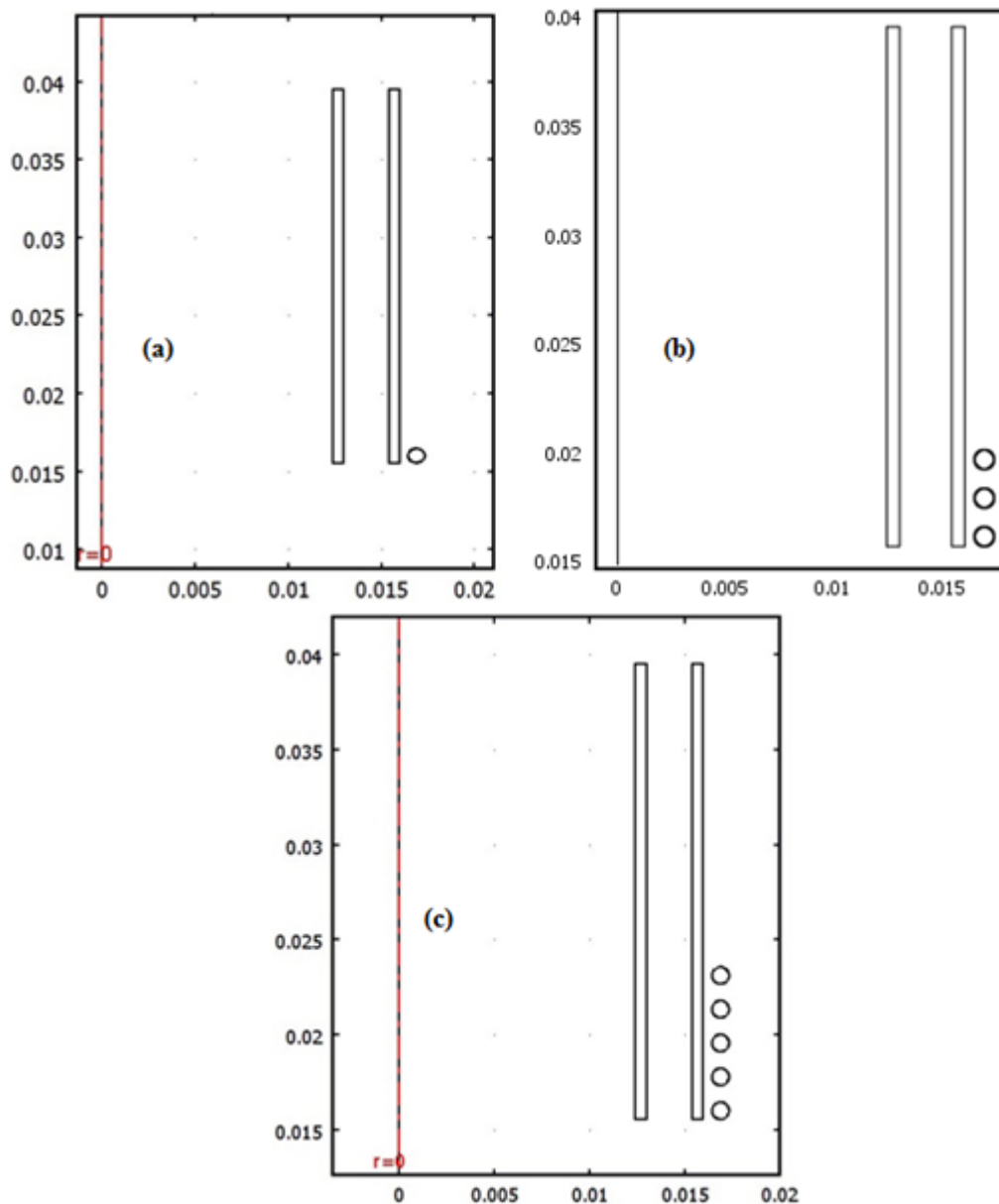


Figure III-23: Installations de soudage des tubes avec inducteurs périphériques ; (a) inducteur de 1 spire ; (b) inducteur de 3 spires ; (c) inducteur de 5 spires

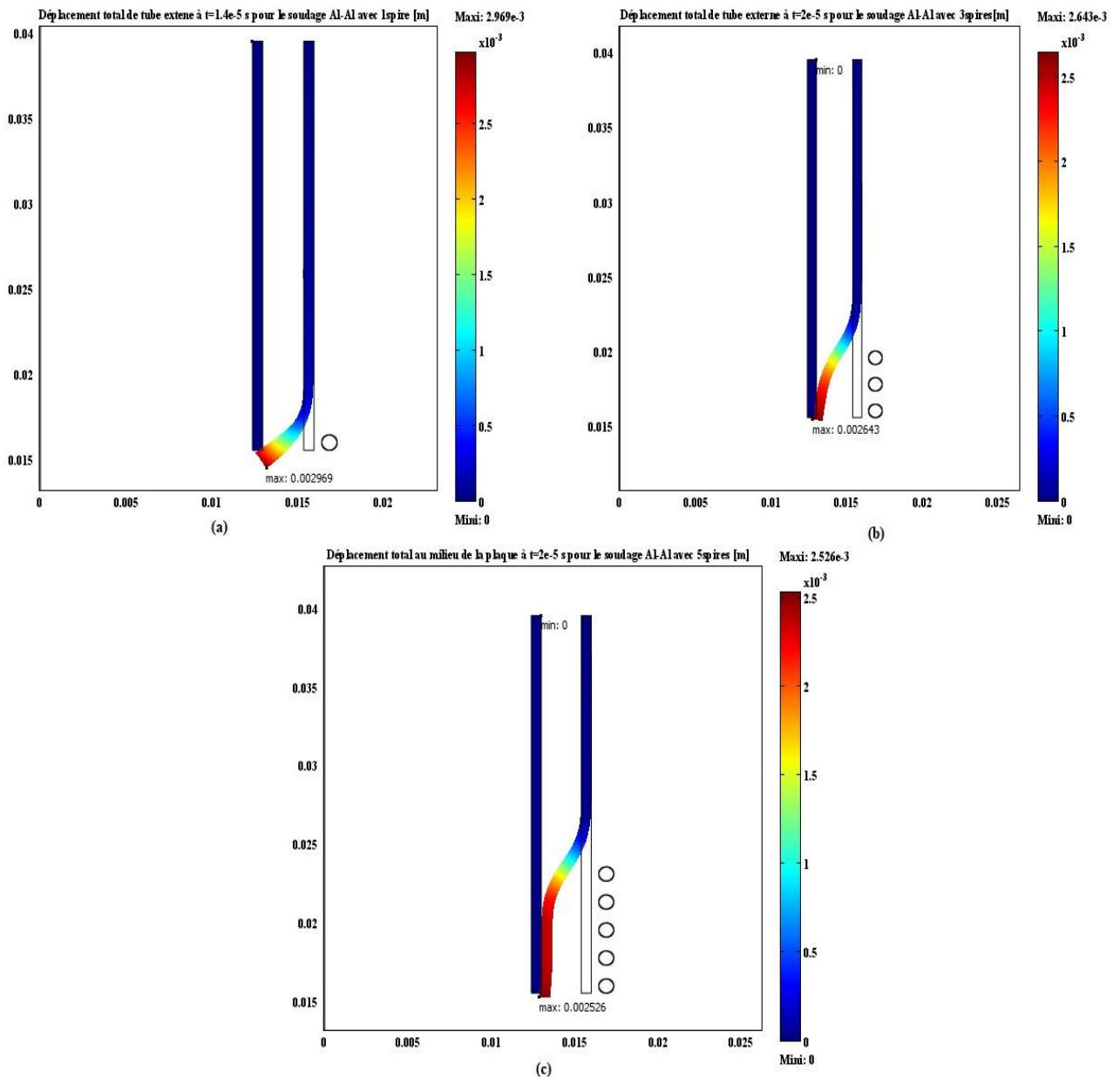


Figure III-24: Soudage des tubes Al-Al avec inducteurs périphériques; (a) inducteur de 1spire ; (b) inducteur de 3spires (c) inducteur de 5spires

### III-3 Applications industrielles

#### III-3-1 1<sup>ère</sup> Application industrielle [28]

Dans la présente application, nous avons considéré la géométrie du système industriel de la référence [28]. Cette installation comporte une paire de plaques plates en Aluminium (100 mm 100 mm 1mm), distantes de 3mm, placées sur un inducteur massif rectangulaire, pour produire une soudure Al/Al (Figure III-25).

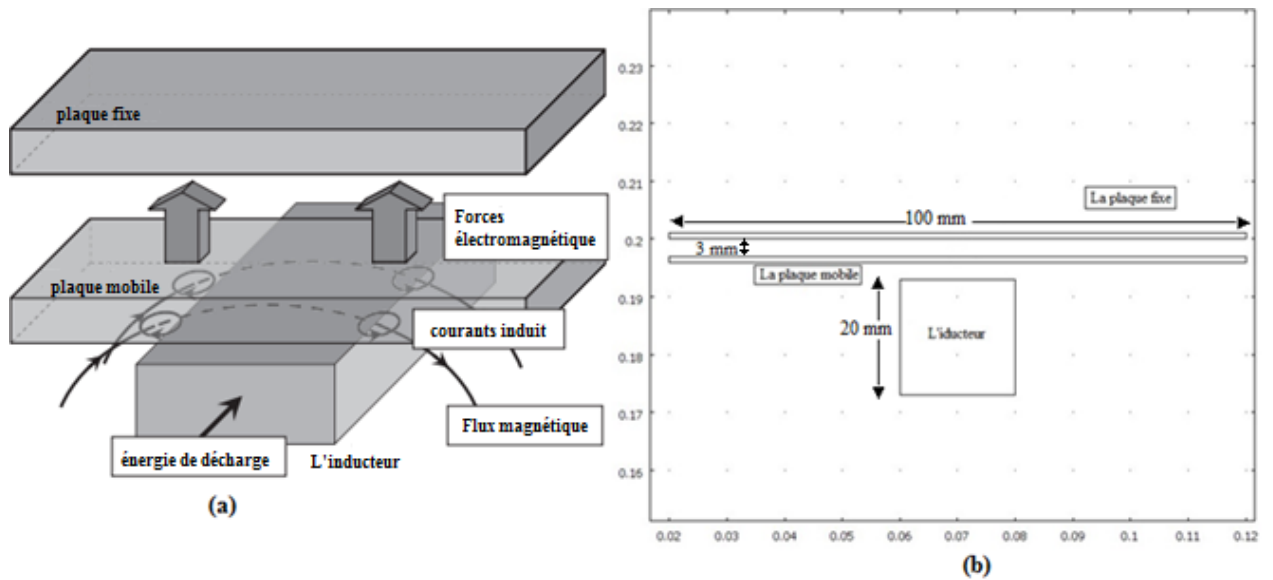


Figure III-25: (a) Installation industrielle [28] ; (b) Géométrie de simulation COMSOL

Lorsque l'impulsion de décharge (Figure III-26(a)), passe à travers l'inducteur, des courants induits sont créés dans la plaque qui se déforme progressivement vers la plaque fixe, ce qui entraîne le soudage des deux plaques Al-Al au bout de  $10\mu\text{s}$  (Figure III-27).

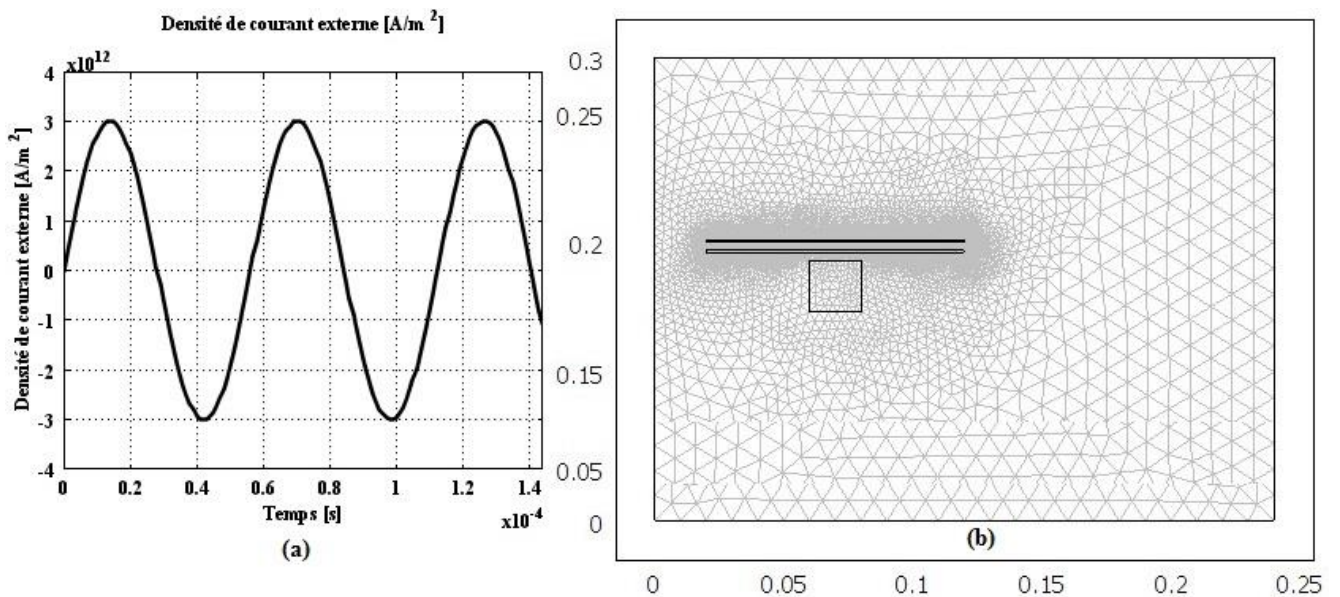


Figure III-26: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage considéré (12752 éléments et 6439 nœud)

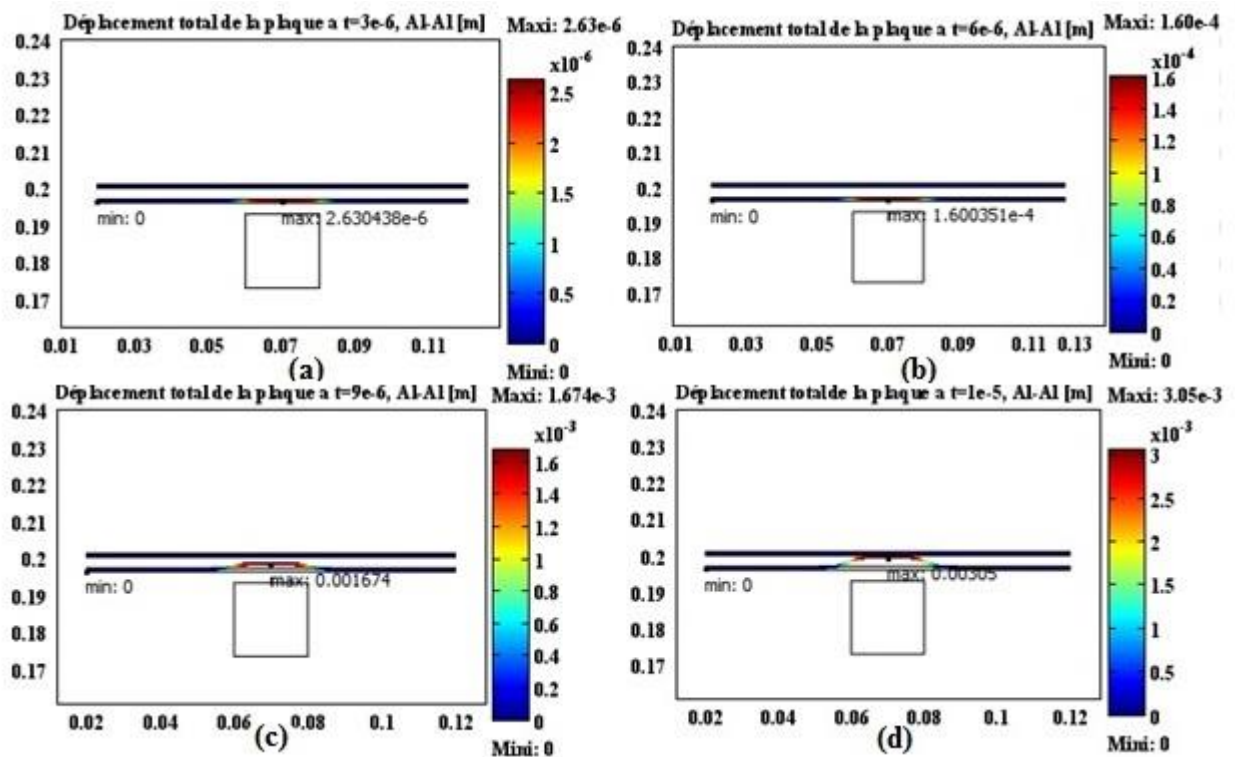


Figure III-27: Evolution temporelle du soudage à différents instants. (a)  $3\mu\text{s}$  après le début de la décharge, (b) Déformation à  $t=9\mu\text{s}$ , (c) Après  $9\mu\text{s}$ , (d) Soudage final à  $10\mu\text{s}$

En comparant, le soudage similaire Al-Al et celui dissimilaire Cu-Al, dans le cas de cette application industrielle [28], nous remarquons, encore une fois et comme dans les cas précédents que le soudage similaire est celui qui présente de meilleures performances en termes de rapidité (temps final de soudage) et en termes de qualité de la soudure (Figures III-28 et 29).

Néanmoins le soudage dissimilaire, malgré qu'il soit plus lent, il reste possible avec ce procédé de soudage par impulsion magnétique.

Tous les résultats numériques obtenus concordent bien avec ceux trouvés expérimentalement [28].



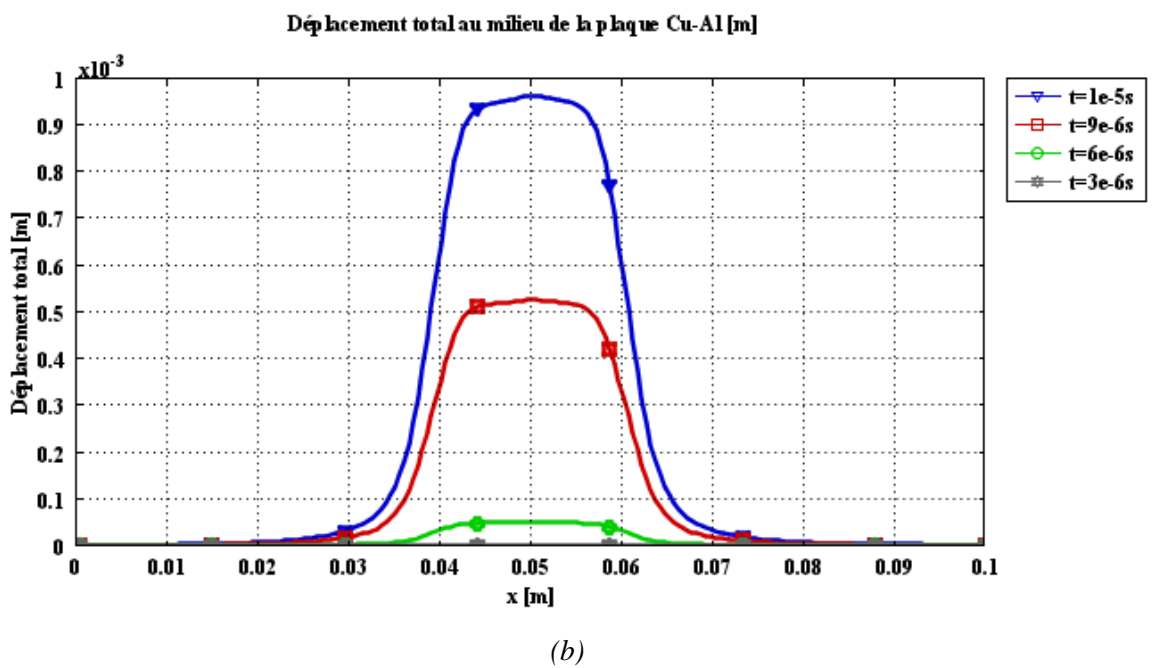
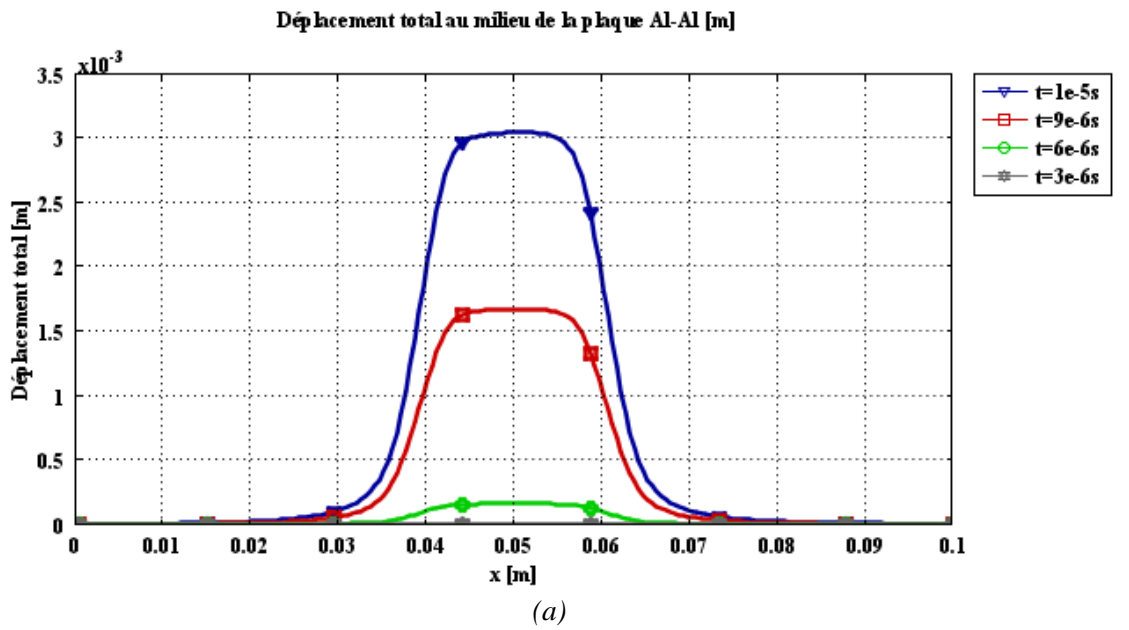


Figure III-28: Déformation de la plaque à différents instants; (a) Soudage Al-Al ; (b) Soudage Cu-Al

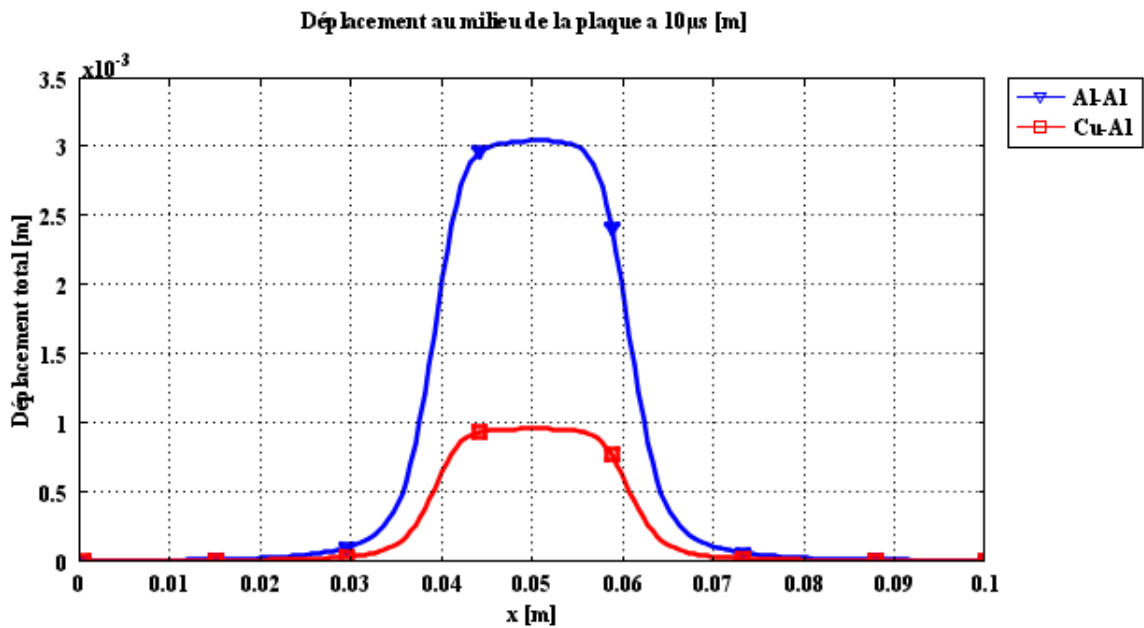


Figure III-29: Déformation finale au milieu de la plaque à  $t=10\mu\text{s}$ , Al-Al et Cu-Al

### III-3-2 2<sup>ème</sup> Application industrielle [29]

Cette application industrielle [29], concerne le processus de SEM des tubes, comportant deux tubes cylindriques en acier ASTM A36 à l'intérieur d'un inducteur cylindrique massif en cuivre. Les propriétés électriques et mécaniques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau (Tableau III-4). A cause de la symétrie axiale, la moitié de la géométrie est étudiée. Les diamètres extérieur et intérieur des tubes étaient ajustés pour étalonner l'entrefer requis entre les tubes, ils sont maintenus fixes à 19mm et 15 mm, respectivement, pour chacun des cas de test. (Figure III-30). Le courant de décharge utilisé (III-3) dans cette application est montré sur (figure III-31(a)).

Les simulations numériques pour évaluer la soudabilité de l'acier ASTM A36 ont été effectuées à différents paramètres du processus.

Tableau III-4: Propriétés électriques et mécaniques des matériaux utilisés [29]

		Cu	Acier ASTM A36
Les propriétés des plaques soudées et de l'inducteur	Densité [ $\text{kg/m}^3$ ]	7850	7850
	Conductivité [S/m]	2.941e7	3.774e7
	Perméabilité relative	1	1
	Module de Young [Pa]	2.0e11	20e9
	Coefficient de Poisson	0.33	0.26

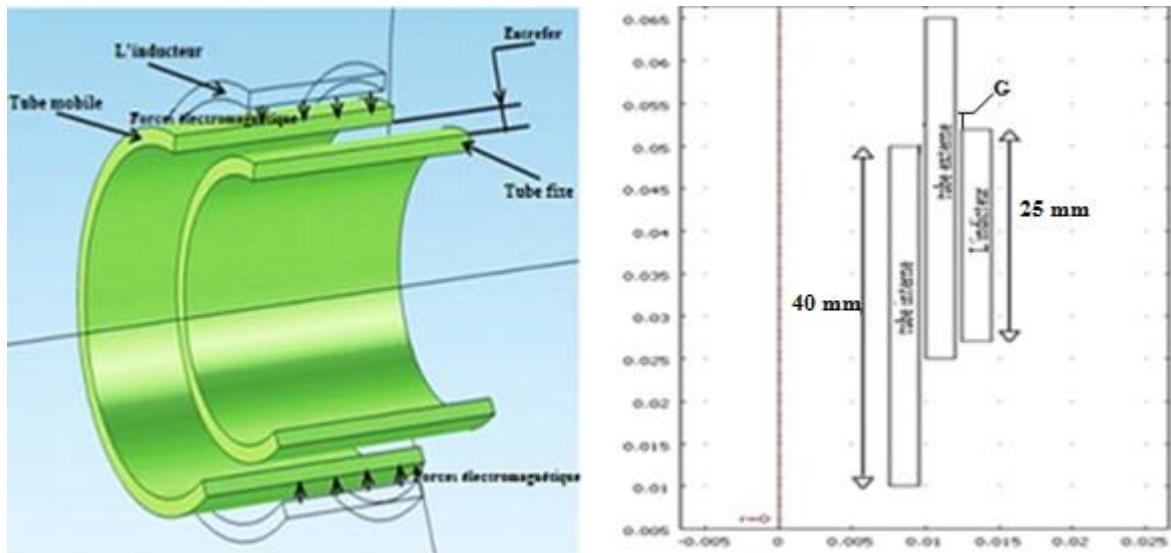


Figure III-30: (a) Photo du système de SEM [29]; (b) Géométrie de simulation COMSOL

$$J_{\phi} = 3.91e^{11} * \exp(-3e^4 * t) * \sin(1.45e^5 * t) \tag{III.3}$$

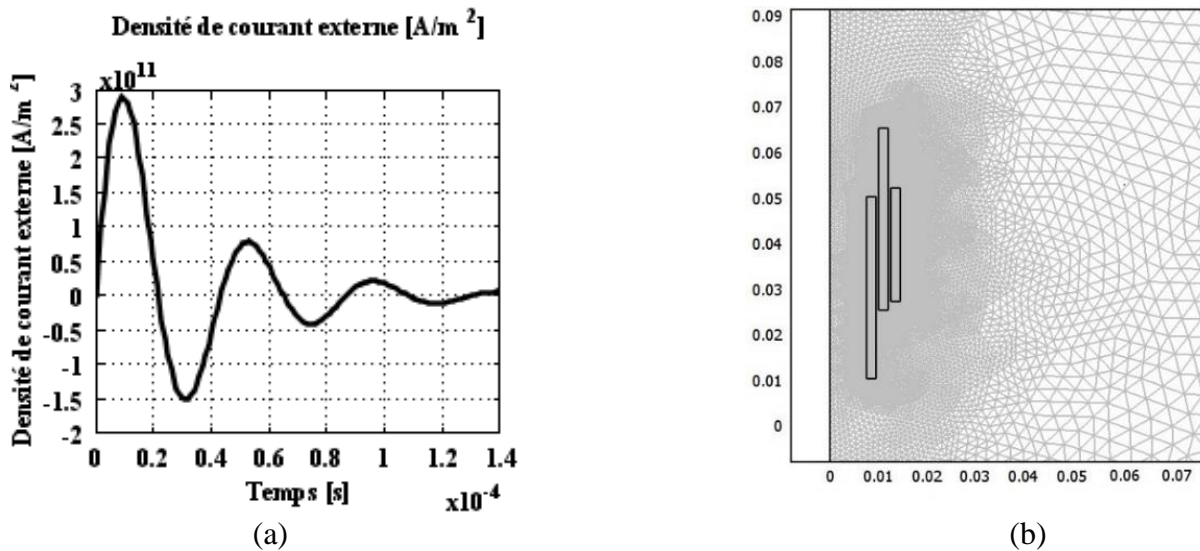


Figure III-31: (a) Densité de courant de décharge ; (b) Maillage (15825 éléments et 1328 nœuds)

### III-3-2-1 Temps final de soudage des tubes

Dans une première simulation, nous analysons l'évolution dans le temps du déplacement du tube externe, en considérons le même courant de décharge précédent (III.3), une distance entre l'inducteur et le tube externe de  $G=1\text{mm}$  et un entrefer entre les tube de  $d=0.5\text{mm}$ .

La figure (Figure III-32 a – d) montre l'évolution temporelle du processus de la déformation du tube externe. Nous pouvons bien remarquer que le soudage est très rapide, la déformation du tube externe n'est observée qu'à partir de 3 microsecondes et atteint rapidement le soudage final avec le

tube interne au bout de 12 microsecondes. Cela revient, certainement, à l'évolution rapide des forces électromagnétiques exercées sur le tube à souder.

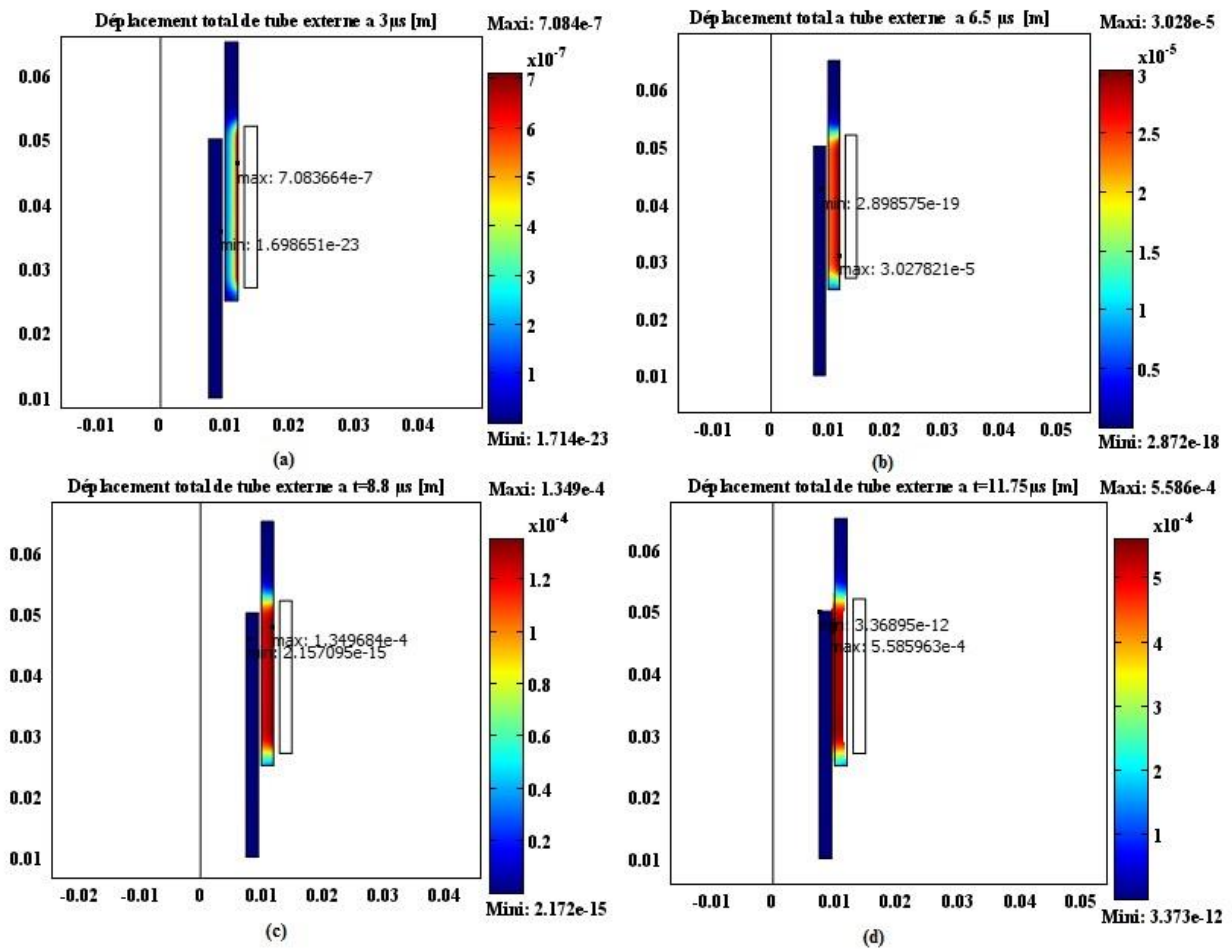


Figure III-32: Evolution temporelle du soudage, (a) Au début de la décharge, (b) A  $t=6.5 \mu$ s, (c) Après  $8.8 \mu$ s. (d) au temps final de soudage  $t=11.75 \mu$ s

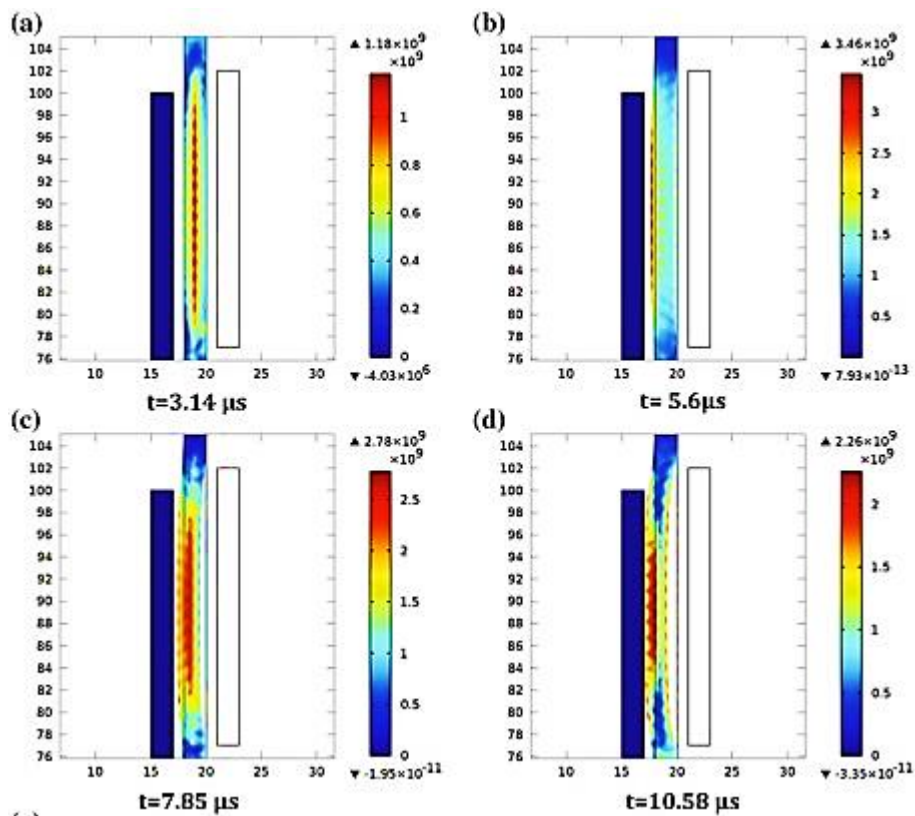


Figure III-33: Evolution temporelle du soudage de l'application industrielle [29].

### III-3-2-2 Effet des paramètres du système sur la soudabilité

Dans un autre travail, nous voulons étudier l'effet de la distance entre l'inducteur et le tube externe sur la soudabilité du tube en acier ASTMA36. Pour cela, nous considérons, cinq valeurs  $G = (0.5\text{mm}-1\text{mm}-1.5\text{mm}-2\text{mm} \text{ et } 2.5\text{mm})$ , avec  $d=0.5\text{mm}$ .

La figure III-33 montre bien, l'augmentation évidente du temps final de soudage avec l'augmentation de la distance entre le tube externe et l'inducteur.

Cela est prévisible et bien expliqué, théoriquement, par le fait que, plus l'inducteur est loin de la charge, plus les forces électromagnétiques (Forces de Lorentz), exercées, sont faibles et donc il faudra plus de temps pour atteindre le soudage final entre les deux tubes.

D'autre part, avec ce courant de décharge (III.3) (figure III-31-a), il est clair que le système le plus rapide ( $t=10$  microsecondes), en termes de temps final de soudage, est celui dont la distance entre l'inducteur et le tube est la plus faible (0.5mm) (figure III-33).

Si nous désirons garder le même temps final de soudage ( $t=10\mu\text{s}$ ), pour les autres systèmes, il faudrait augmenter l'énergie du générateur c'est à dire augmenter le courant de décharge (Figures III-34 a-b-c-d-e).

D'après notre simulation numérique, le courant, utilisé précédemment, doit être augmenté d'un facteur. Les valeurs obtenues sont regroupés dans le tableau III-5. Les formes obtenues sont montrées sur la figure III-35.

Les résultats obtenus pour les cinq tests, nous ont permis d'établir des lignes de soudabilité en termes de temps final de soudage (Figure III-36-a) et en termes de courant de décharge nécessaire pour un soudage au bout de  $10\mu\text{s}$  (Figure III-36-b).

Ainsi, l'augmentation de la distance entre l'inducteur et le tube externe, nécessite plus de temps de soudage, avec un même générateur de décharge. Par contre, elle nécessite plus d'énergie si l'on désire un soudage rapide (par exemple au bout de  $10\mu\text{s}$ ).

Dans l'industrie, on cherche un compromis entre le temps de fabrication et l'énergie consommée.

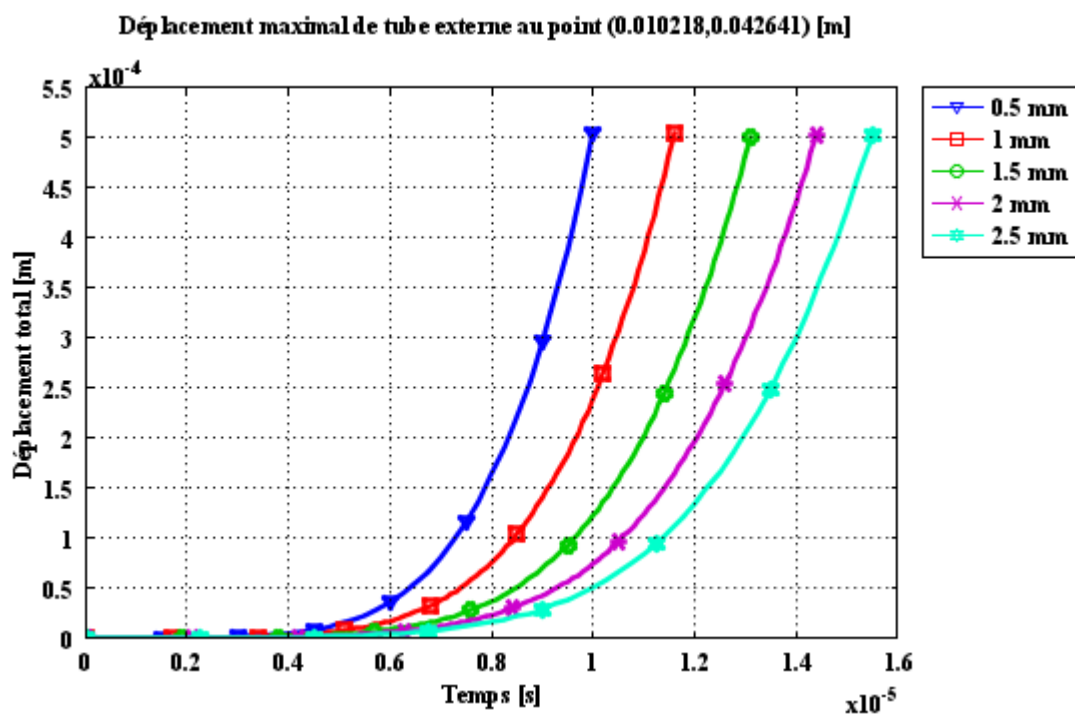


Figure III-34: Variation du déplacement maximal du tube externe au point (0.01028 ; 0.042641) pour cinq différents tests

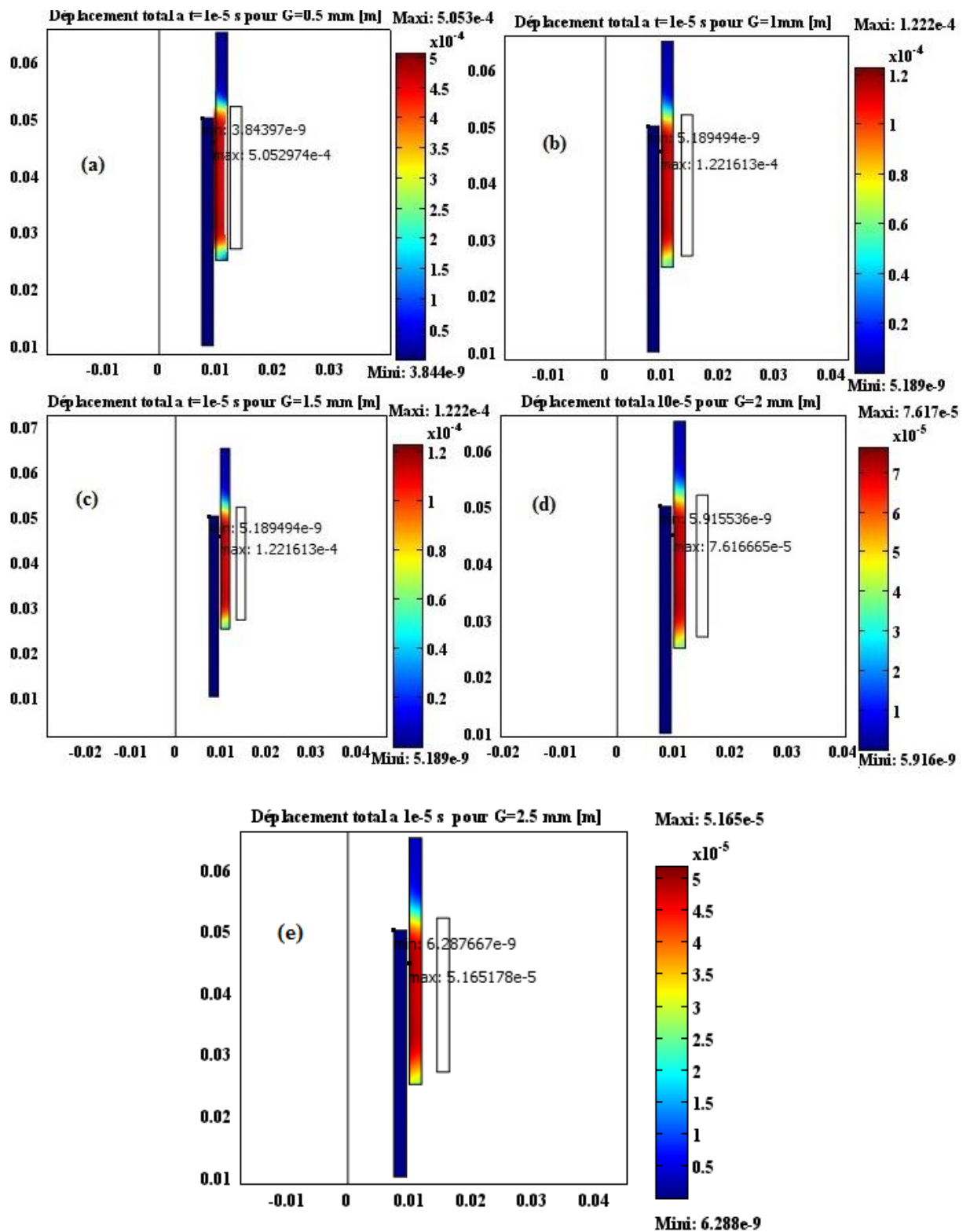


Figure III-35: L'effet de la variation de valeur  $G$  sur le soudage des tube, (a)  $G=0.5$ mm, (b)  $G=1$ mm, (c)  $G=1.5$ mm, (d)  $G=2$ mm, (e)  $G=2.5$ mm



Tableau III-5: Propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés

L'amplitude de la densité de courant de décharge [A/m <sup>2</sup> ]	La valeur de la distance entre l'inducteur et le tube externe [mm]
$J\varphi$	0.5
$J\varphi*1.45$	1
$J\varphi*1.89$	1.5
$J\varphi*2.32$	2
$J\varphi*2.74$	2.5

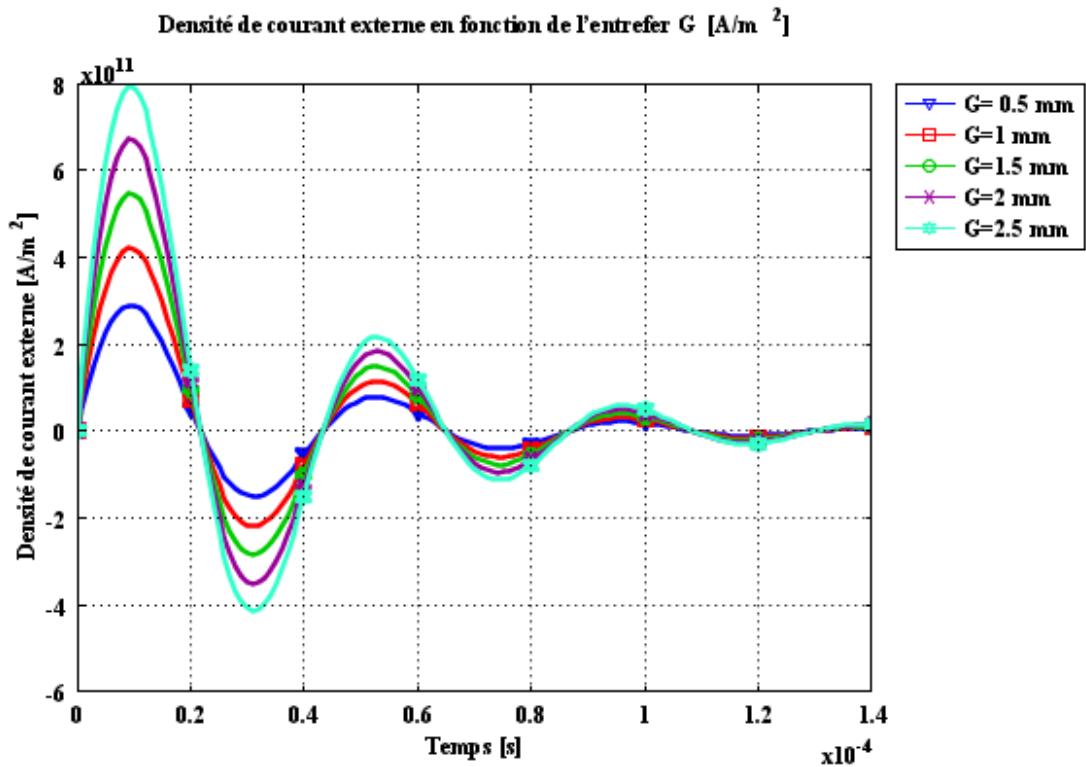


Figure III-36: Densité de courant de décharge selon l'entrefer G

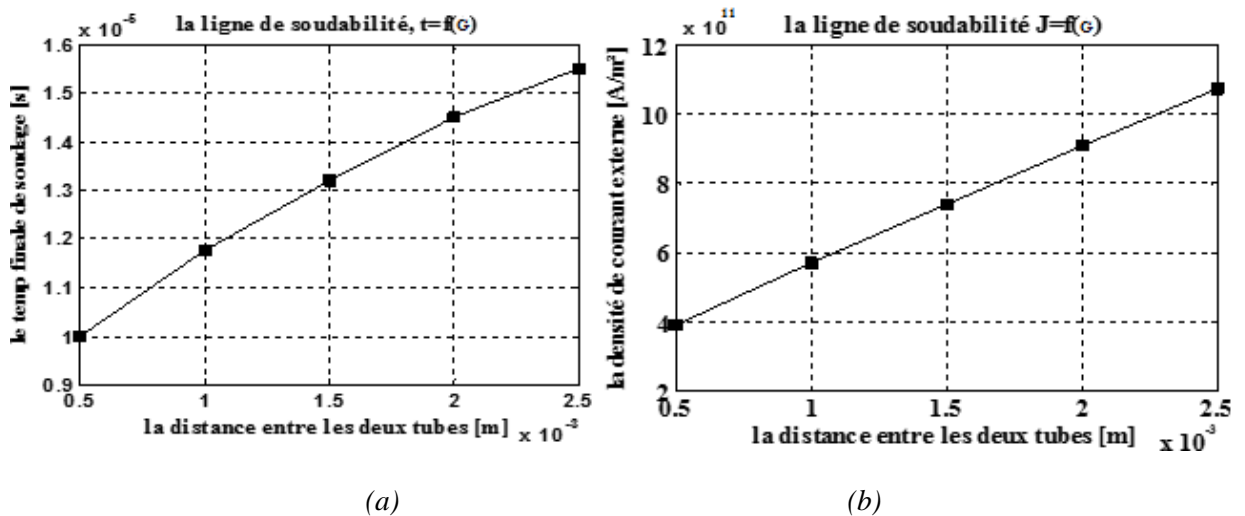


Figure III-37: La ligne minimale de soudabilité des tubes d'acier ; (a) en termes du temps final de soudage; (b) en termes de la densité de courant de décharge requise



### III-3-3 Soudage des tubes par conformateur de champ [17]

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

En effet, une technologie de soudage innovante pour des plaques ou tubes est celle utilisant le conformateur de champ qui concentre le champ magnétique dans la zone de travail tout en augmentant son intensité. De plus, on peut aussi contrôler le champ électromagnétique et la déformation consécutive du matériau en utilisant diverses géométries de la forme de champ pour la même bobine [17].

#### III-3-3-1 Installation industrielle de soudage des tubes par conformateur de champ [17]

La Figure III-37, illustre une installation de soudage de tubes par conformateur, utilisée dans l'industrie [17] et la géométrie utilisée dans notre modèle numérique (Figure III-37-(b)). Cette installation comporte une barre en cuivre, située à l'intérieur d'un tube en alliage d'aluminium, le tout est entouré par le conformateur de champ en alliage de cuivre (Figure III-37-(a)). Les propriétés des différents matériaux sont regroupées dans le tableau III-6. Le courant externe, délivré par le générateur de décharge est celui de la figure III-38-(a). A cause de la symétrie axiale, seulement la moitié de la géométrie 2D, est considérée dans notre modélisation numérique, utilisant le maillage éléments finis, comportant 5900 éléments et 3010 nœuds (Figure III-38-(b)).

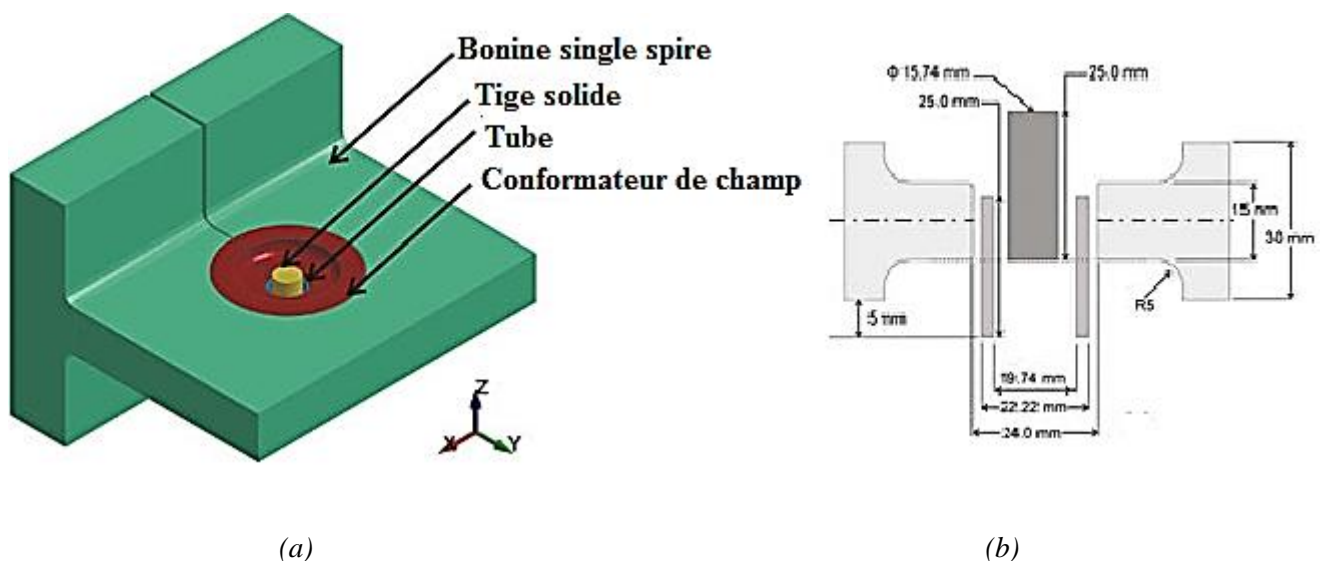


Figure III-38: (a) La géométrie 3D de l'installation, (b) Géométrie utilisée numériquement sans l'inducteur [17]

Tableau III-6: Propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés [17].

Matériau	Partie	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Module de Young [GPa]	Rapport de Poisson	La conductivité électrique[S/m]
Alliage d'aluminium 2024	Tube	2700	73	0.33	$1.74 \times 10^7$
Cuivre pur	Barre	8900	124	0.34	$3.48 \times 10^7$
Alliage de cuivre	Conformateur de champ	7900	210	0.29	$2.66 \times 10^7$
Acier	Inducteur	-----Rigide-----			$4.06 \times 10^6$

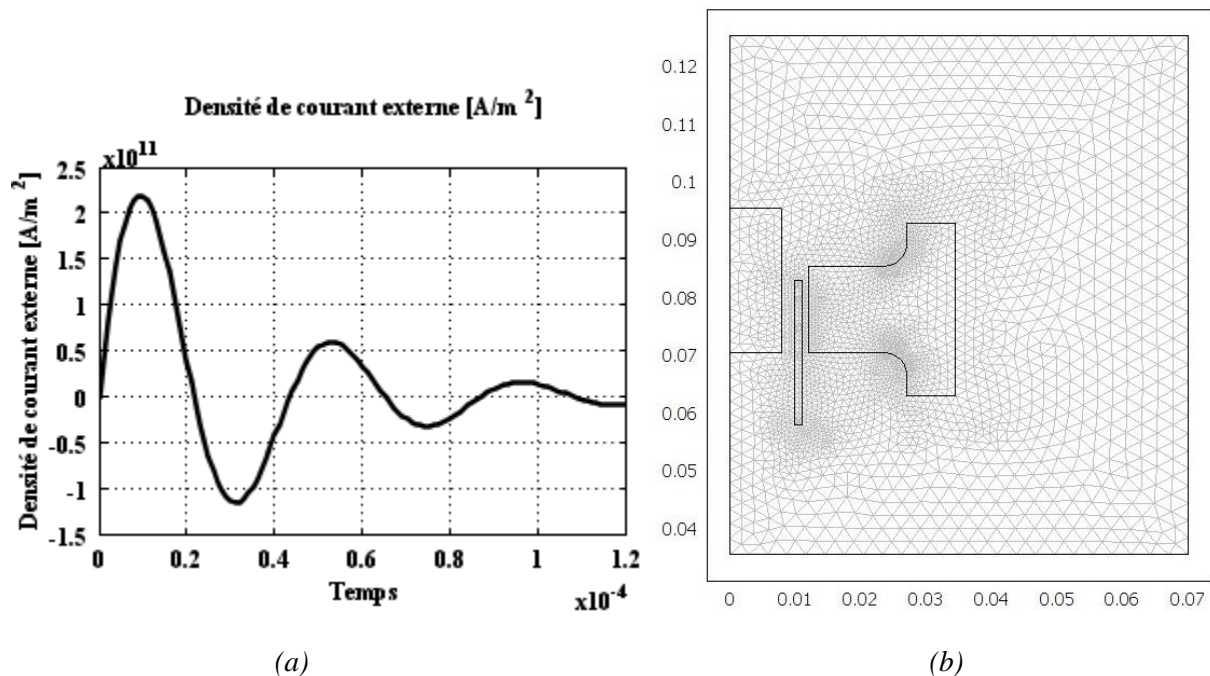


Figure III-39: (a) Densité de courant de décharge, (b) maillage utilisé (5900 éléments et 3010 nœuds)

### III-3-3-2 Simulation de soudage avec inducteur massif

Afin de mettre en évidence le rôle et l'utilité du conformateur de champ, on se propose de simuler en premier lieu le soudage avec l'inducteur massif seul sans le conformateur de champ, comme la montre le Figure III-39, puis, nous introduisons le conformateur de champ.

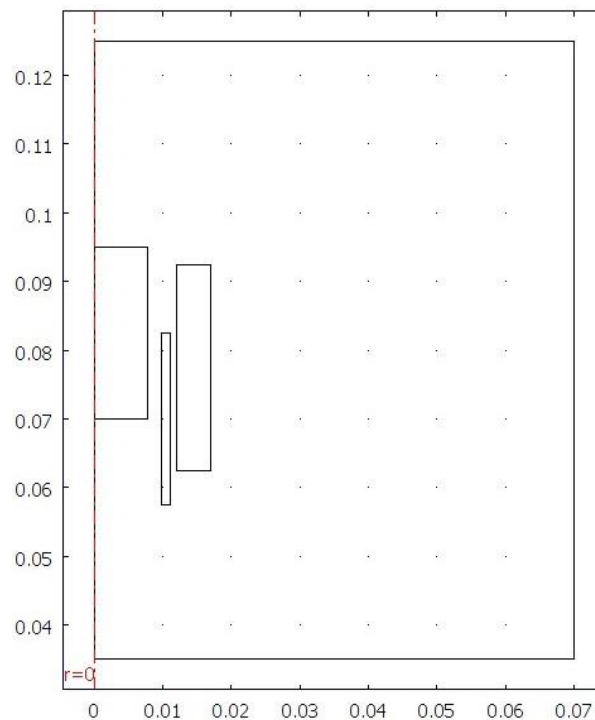


Figure III-40: La géométrie de soudage des tubes avec inducteur massif

On commence par représenter la déformation externe du tube sans conformateur de champ, au moment de contact avec la barre intérieure ( $t=21\mu\text{s}$ ) (Fig. III-40-a) ainsi que l'évolution temporelle du déplacement au milieu du tube (Fig. III-40-b).

Nous remarquons, clairement que le tube externe est presque totalement déformé avec une déformation accentuée au niveau de la pointe. Cela n'est pas le soudage recherché. Cela peut être expliqué par le fait que la distribution du champ magnétique, les courants induits et les forces de Lorentz ne sont pas concentrés dans la zone de soudage désirée (figures III-41-a-b). D'où la nécessité de l'emploi d'un conformateur de champ pour un meilleur aiguillage du champ et des forces.

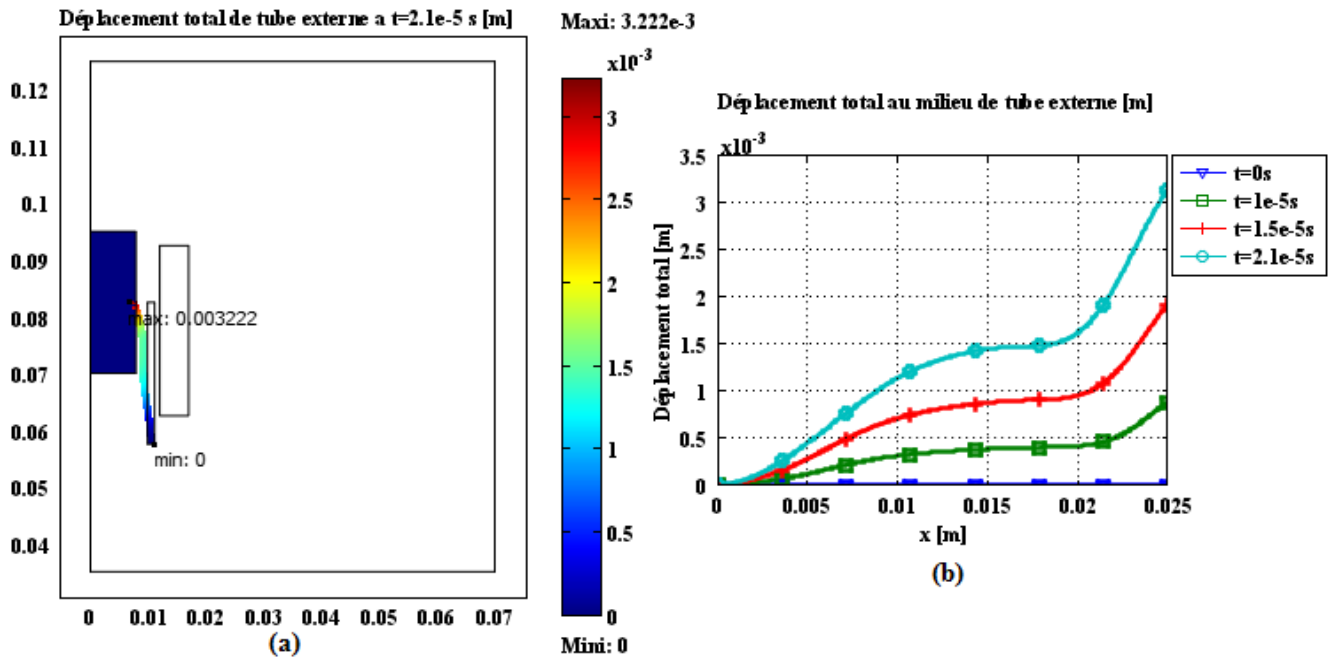


Figure III-41: (a) Soudage des tubes sans conformateur de champ; (b) Déplacement du point milieu du tube externe

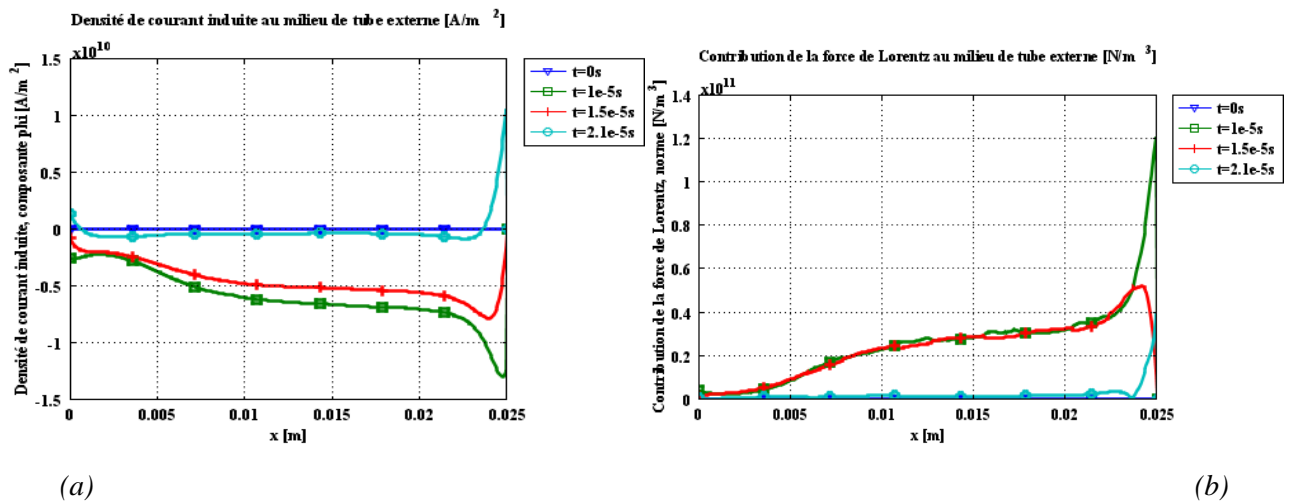


Figure III-42: (a) Evolution temporelle de la densité de courant induite créée au milieu de tube externe; (b) L'évolution temporelle des forces de Lorentz

### III-3-3-3 Simulation de soudage utilisant le conformateur de champ

En introduisant le conformateur de champ entre l'inducteur et le tube, la déformation obtenue numériquement, est bien différente du cas précédent (sans conformateur).

En effet, la déformation est bien concentrée sur la partie du tube en face du conformateur, le soudage du tube avec la barre est bien obtenu dans cette partie et toujours au même temps final ( $t=21\mu s$ ) (Figure III-42).

Evidemment, cela est dû à la concentration du champ magnétique dans la zone de soudage, grâce au conformateur (Figure III-43-a), ainsi que la distribution des courants induits dans cette partie du tube (Figure III-43-b).

La Figure III-44 illustre une comparaison entre le déplacement du milieu du tube, avec et sans le conformateur.

Grace aux résultats numériques de cette application, nous avons pu mettre en évidence l'effet du conformateur sur le soudage magnétique des pièces, en particulier des tubes, et son utilité dans la concentration du champ magnétique sur la pièce à souder et par conséquent dans l'amélioration de la forme du soudage et la largeur de la zone soudée.

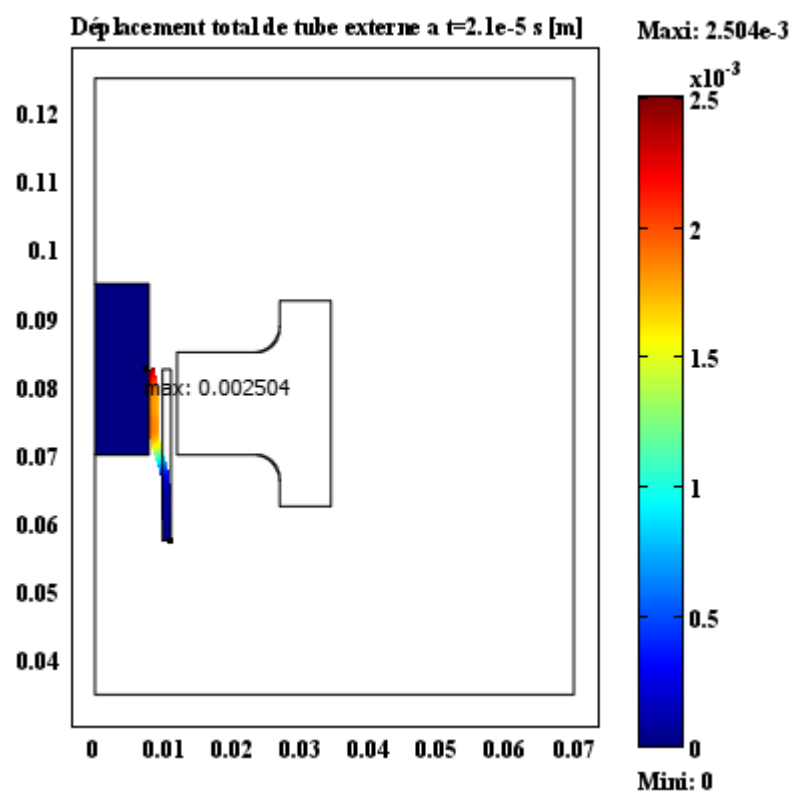


Figure III-43: Soudage avec conformateur de champ

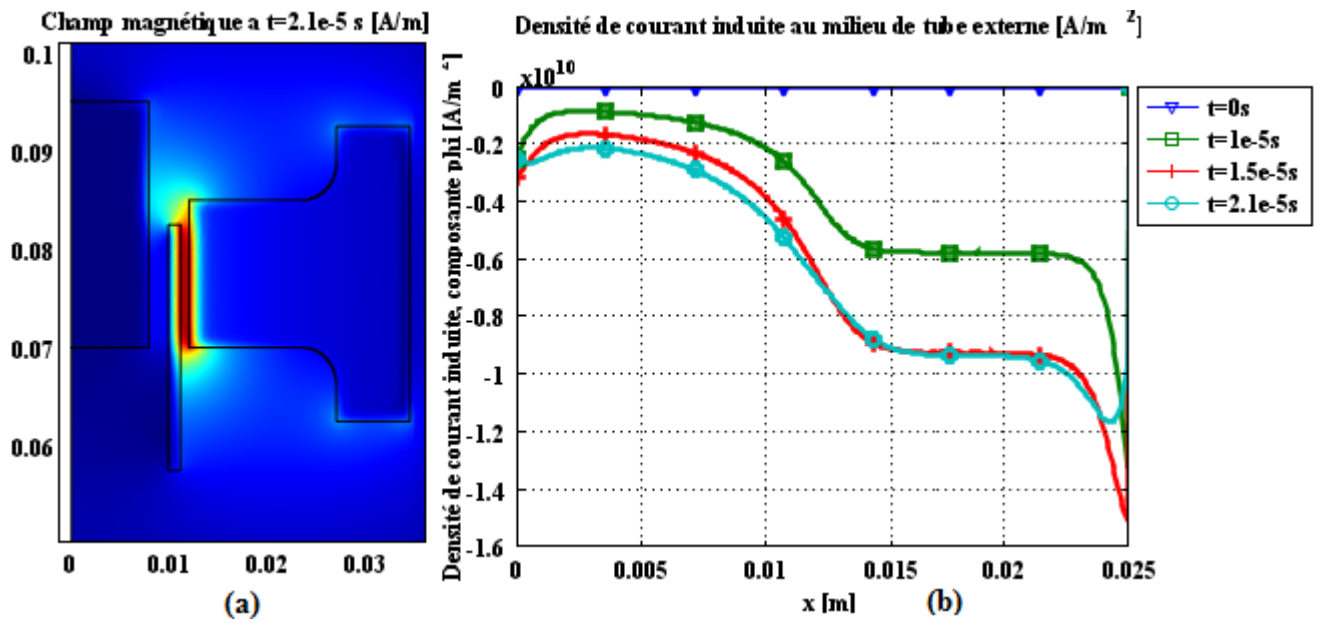


Figure III-44: (a) Concentration du champ magnétique, (b) Distribution des courants induits le long du tube

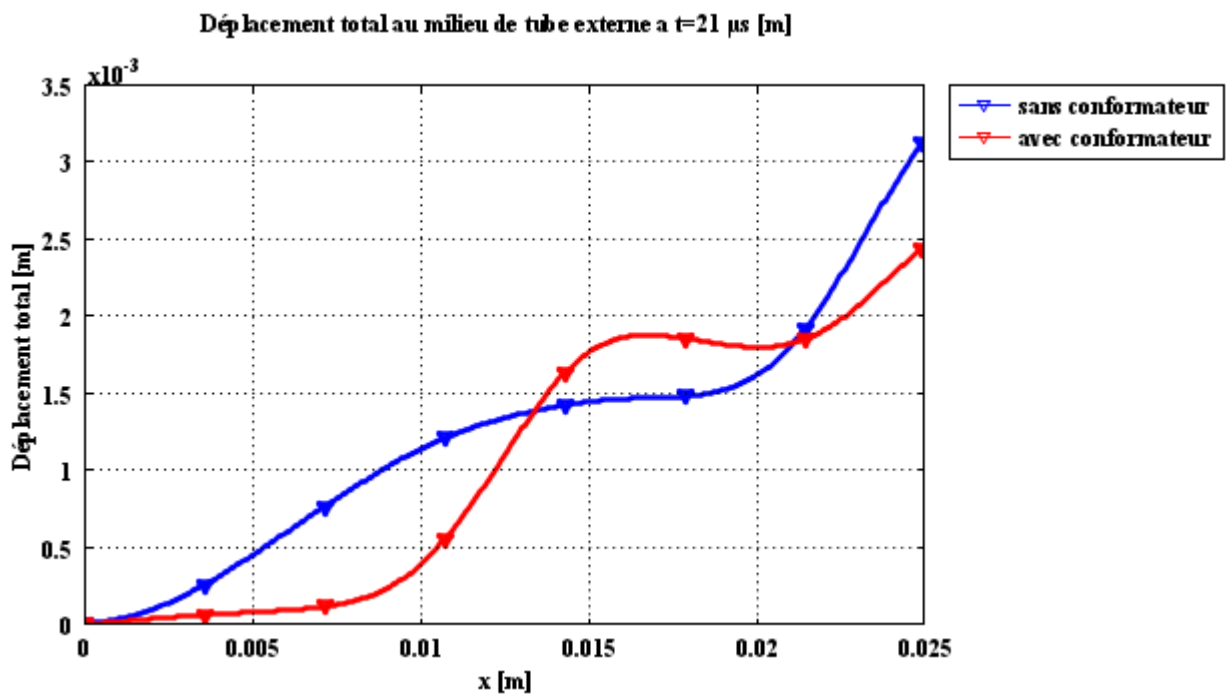


Figure III-45: Déplacement au milieu de tube externe sans et avec conformateur de champ

## Conclusion

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

Les résultats numériques ont montré que les forces électromagnétiques sont intenses, surtout aux premiers instants du soudage, ce qui permet d'avoir un soudage rapide meilleur. Ces forces sont concentrées au niveau des plus faibles interfaces bobine-pièce. C'est-à-dire dans les parties face aux spires de l'inducteur.

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 de certains paramètres du processus de soudage par impulsion magnétique a été réalisée. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Plus, les conductivités électriques sont importantes, plus les courants induits, les forces de Lorentz et par conséquent la déformation et le soudage des pièces (plaques ou tubes) sont importants.
- La distance entre l'inducteur et les pièces à souder joue un rôle major dans le processus de SEM. Dans le cas où l'inducteur est très rapproché de la pièce, la pression magnétique et par conséquent le soudage sont plus grands.

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

---

*Conclusion*

*Générale*

---



## **Conclusion Générale**

L'objectif général de ce travail était de développer un outil numérique de simulation du soudage par impulsion électromagnétique de plaques ou de tubes. Le but de cet outil était d'être exploitable dans la prédiction de la réalisation du SEM et dans la contribution à la compréhension du processus.

Un état de l'art préalable à tout travail, a mis en évidence qu'un outil de simulation de cette technique de soudage était nécessaire.

Pour la modélisation du processus SEM, nous avons envisagé un modèle numérique par éléments finis, couplant tous les phénomènes physiques liés au processus de SEM : Le problème électromagnétique décrivant la dynamique des champs électromagnétiques et le calcul des forces électromagnétiques; et le problème mécanique lié à la mécanique de déformation des pièces à souder. Ces deux problèmes sont fortement couplés pour complètement définir les systèmes de SEM considérés. Les prédictions numériques sont comparées à celles expérimentales et un accord satisfaisant a été obtenu.

Les simulations numériques ont pu être appliquées, avec une précision, aux applications industrielles du processus de SEM, aussi bien des plaques que des tubes. L'objectif était de fournir une méthode qui permet de prédire, non seulement avec précision les propriétés finales de la pièce soudée, mais également de contrôler le calcul des paramètres de base de l'installation et du processus. Afin d'atteindre l'objectif proposé, il convient d'étudier l'évolution de toutes les quantités qui caractérisent le système de SEM au cours du processus de déformation.

Globalement, cette étude a permis de développer une très vaste base de données qui servira de base aux travaux futurs. Ces travaux ont ouvert de nouvelles perspectives pour la recherche dans le domaine des technologies de soudage électromagnétique innovantes à haute vitesse.

En perspectives, certaines améliorations de notre modèle numérique pourraient être effectuées. Tout d'abord, il convient de mentionner que, bien que notre outil numérique reproduise efficacement les tendances expérimentales, certains phénomènes physiques négligés dans nos simulations (par exemple, l'effet de l'inductance mutuelle) pourraient donner de meilleurs résultats. En outre; nous observons que notre modèle peut encore être étendu aux applications tridimensionnelles. Il serait intéressant de développer un modèle tridimensionnel similaire pour les applications industrielles. De nombreux processus de SEM sont souvent non axisymétriques et sont mieux gérés dans un environnement tridimensionnel. Différentes géométries, encore plus complexes, utilisées dans l'industrie, peuvent être simulées par notre code numérique.

Un autre modèle plus approprié, est celui qui prend en compte l'effet d'autres paramètres géométriques et physiques du processus. Cela peut inclure l'influence de la température, l'inductance mutuelle, le matériau de la bobine, la perméabilité, etc.

---

# *BIBLIOGRAPHIE*

---

## **Bibliographie**

- [1] M. Merklein, M. Geiger., « New Materials and Production Technologies for innovative lightweight constructions », *J MATER PROCESS TECH* 125-126(2002) 532-536.
- [2] N. Sakundarini, Z. Taha, S. H. Abdul-Rashid, R. A. Raja Ghazila, « Optimal multi-material selection for lightweight design of automotive body assembly incorporating recyclability », *Materials & Design* 50 (2013) 846–857.
- [3] : BMC. Tomas, « Magnetic pulse welding MPW » thèse de doctorat de l'université Nova de Lisboa, 2010.
- [4] : A-C. Jeanson, G. Avrillaud, et al. « Identification du comportement mécanique dynamique de tube d'aluminium par un essai d'expression électromagnétique » *CSMA 2013 le colloque notionnel en calcul des structures*, mai 2013.
- [5] : I. Hafsaoui, « Etude et modélisation numérique tridimensionnelle des effets mécaniques du champ électromagnétique » thèse doctorat de l'université de Jijel, 2009.
- [6] : A. Guglielmetti, « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique » thèse doctorat de l'université de technologie de Compiègne de Québec à Chicoutimi, 29 Juin 2012.
- [7] : Guy. M, « Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur », 10 janvier 1994 (M715).
- [8] : F. Aissaoui, « Comportement mécanique des soudures par points. Effets d'arrangement des points de soudures dans le cas des tôles en acier inoxydable. » Mémoire de fin d'étude de l'université de Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 24 juin 2018.
- [9] : MA. Ait Ouali et R. Maafa, « Etude et commande de la presse de soudure d'une conditionneuse du Yaourt, à « DANONE DJURDJURA SPA » Mémoire de fin d'étude de l'université de A/Mira de Bejaïa, 25 Juin 2015.
- [10] : O.R. Lasertechnologie GmbH. (2019, 1 juin). « Soudage du plastique au laser » Consulté sur <https://www.or-laser.com/fr/soudage-laser/soudage-du-plastique-au-laser/?C=1>.
- [11] : A. Baari, « Etude de soudage à l'état solide (soudage par friction), étude de cas : Soudage d'une tige de forage » Mémoire de fin d'étude de l'université de Kasdi Merbah Ouargla, 20 Juin 2018.
- [12] : INRS. (2014, Juillet) Document INRS Guide de ventilation n°7 « Opérations de soudage à l'arc et de coupage » Consulté sur [.http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20668](http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20668).

- [13] : E. Vanvuchelen, « Le soudage parfait par impulsion magnétique », *Industrie Technique et Management*, 21 juin 2010.
- [14] : M. Merklein, M. Geiger., « New Materials and Production Technologies for innovative lightweight construction », *J MATER PROCESS TECH* 125-126(2002) 532-536.
- [15] : M.guillot, « la production de champs magnétiques intenses transitoires: les effets secondaires deviennent prépondérants », *RGE revue générale d'électricité*, N. 9, pp.37-48 1987.
- [16] : Jassim, A.K., « Comparison of Magnetic Pulse Welding with Other Welding Methods », *Journal of Energy and Power Engineering*, 2011, 5, 1173-1178.
- [17] : T. Sapanathan, R. N. Raoelison, N. Buiron et M. Rachik, « Magnetic pulse welding: an innovative joining technology for similar and dissimilar metal pairs », dans I. Mahadzir (dir.) , *Joining Technologies*, Malaysia, 2016,pp. 244 - 268.
- [18] : T. Sapanathan, R. N. Raoelison, N. Buiron et M. Rachik « Magnetic pulse welding: An innovative joining technology for similar and dissimilar metal pairs » Sorbonne universités, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne cedex, France, Chapitre 11.
- [19] : M. Leroy, J. Y. Renoud, AR.M.E.C.A, « Bobines pour champs magnétiques intenses »Brevet N°75 35 401.19 Novembre 1975.
- [20] : F. Rapetti, « Approximation des équations de la magnétodynamique en domaine tournant par la méthode des éléments avec joints » thèse doctorat en spécialité mathématique appliquées de l'université Paris 6, 29 Mai 2000.
- [21] : A. Guglielmetti, « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique » thèse doctorat de l'université de technologie de Compiègne de Québec à Chicoutimi, 29 Juin 2012.
- [22] : M. Zaouïa, « Modélisation numérique du couplage électromagnétique-mécanique dans les structures linéaires tubulaires » magister de l'EMP d'Alger, 05 Mai 2013.
- [23] : Dj. Belfares et Y. Touati, « Modélisation électromagnétique et mécanique de l'expansion d'un tube par magnétoformage » mémoire de fin d'étude de l'université de Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [24] : P. Dular, « Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans des systèmes tridimensionnels non linéaires » thèse de doctorat de l'université de Liège Belgique, 24 nov 1994.
- [25] : MC. Nguyen, « Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG » thèse doctorat de l'université d'Aix-Marseille, 04 nov 2015.

[26] : [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). (23 avril 2019). Loi de Hooke. Récupéré le 25 Mai 2019 consulté sur [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi\\_de\\_Hooke&oldid=158691416](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Hooke&oldid=158691416).

[27] : M<sup>ed</sup> A. Boussalem, « Modélisation du comportement mécanique d'un système de formage électromagnétique » mémoire de fin d'étude de l'université de Mohamed Seddik ben Yahia de Jijel, 2014.

[28] : M. Watanabe et .Kumai, « High-speed deformation and collision behavior of pure aluminum plates in magnetic pulse welding » *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 8 (2009) pp. 2035 to 2042.

[29] : W. Xiaolong, Y. Hui et L. Guangliang, The Application of COMSOL Multiphysics in direct current method forward modeling », 2011 Xian International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines, *Procedia Earth and Planetary Science* 3 ( 2011 ) 266 – 272.

[30] : M<sup>ed</sup> A. Boussalem, « Modélisation du comportement mécanique d'un système de formage électromagnétique » mémoire de fin d'étude de l'université de Mohamed Seddik ben Yahia de Jijel, 2014.