

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° : ...../2024

### **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Électromécanique**

**SPECIALITE: Électromécanique**

### **Thème**

**Assemblage de pièces industrielles par  
sertissage électromagnétique**

**Présenté Par : BERRALI Anis**

**Encadré Par : Dr. I. BOUTANA HAFSAOUI**

**AHMIA Islam**

**Date de soutenance: 01/07/2024**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : M. R. MEKIDECHE**

**Grade PROF.**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : I. BOUTANA HAFSAOUI**

**Grade MCA**

**Univ MSB jijel**

**Examineur : D. SEDIRA AMIOUR**

**Grade MCA**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2023 /2024**

## RESUME

La technologie de Sertissage électromagnétique (SRTEM) est un processus de formage à grande vitesse qui utilise des forces magnétiques pour déformer et joindre les pièces. Le SRTEM est un processus d'assemblage, par impulsions électromagnétiques, et se caractérise par le contact non existant entre la pièce conductrice et l'outil. La déformation de la pièce est engendrée par les forces de Lorentz. Celles-ci sont créées par une décharge rapide d'un courant transitoire intense à travers une bobine, ce qui induit un champ magnétique transitoire opposé dans la pièce de travail, entraînant l'interaction répulsive entre la bobine et la pièce à sertir. Le présent mémoire vise à étudier et analyser ce processus en développant des modèles numériques éléments finis avec le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

**Mots clés :** Formage électromagnétique, soudage par impulsion magnétique, sertissage électromagnétique, modélisation numérique, Comsol Multiphysics.

## ABSTRACT

Electromagnetic Crimping Technology (EMC) is a high-speed forming process that uses magnetic forces to deform and join parts. EMC is from the lineage of the Electromagnetic Pulse Technology, and it is characterized by the non-existing contact between the workpiece and the tool. The deformation of the workpiece is a result of the Lorentz forces. These are due to a fast discharge of an intense transient current through a coil, which will induce an opposite transient magnetic field in the workpiece, resulting in the repulsive interaction between the coil and the workpiece. The present dissertation intends to promote the study and analysis of this process by developing numerical models with finite element Multiphysics software that is COMSOL MULTIPHYSICS.

**Keywords:** Electromagnetic Forming, Magnetic Pulse Welding, Electromagnetic Crimping, Numerical Modeling, COMSOL Multiphysics.

## ملخص

تقنية التقليد الكهرمغناطيسي هي عملية تشكيل عالية السرعة تستخدم قوى مغناطيسية لتشوه الأجزاء والجمع بينها. هي من سلالة تكنولوجيات النبض الكهرمغناطيسي، وهي تتميز بالاتصال غير الموجود بين قطعة العمل والأداة. تشوه قطعة العمل هو نتيجة لقوات لورنتز. هذه هي نتيجة لتفريغ سريع لميض عابر حاد من خلال الملف، الذي سوف يحفز حقل مغناطيسي عابر معاكس في قطعة العمل، مما يؤدي إلى التفاعل الاهتزازي بين الملف وقطعة العمل. ويهدف هذا البحث إلى تعزيز دراسة هذه العملية وتحليلها عن طريق وضع نماذج رقمية ذات برامجيات متعددة الفيزياء ذات عناصر محدودة، وهي برامجيات كومسول المتعددة التخصصات

**الكلمات المفتاحية:** التشكيل الكهرمغناطيسي، اللحام بالنبض المغناطيسي، التقليد الكهرمغناطيسي، النمذجة العددية، الكمسول المتعدد التخصصات.

## **REMERCIEMENTS**

*En premier lieu, notre gratitude va vers le Créateur pour la force et l'endurance qu'il nous a octroyées pour mener à bien cette étude.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre estimée docteur, Ilhem BOUTANA HAFSAOUI, pour son accompagnement dans ce projet de mémoire. Ses précieux conseils, son soutien indéfectible et ses encouragements ont joué un rôle essentiel dans l'achèvement de cette recherche.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leur disponibilité et leurs précieuses directives qui ont enrichi notre parcours académique.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui ont apporté leur aide, de manière directe ou indirecte, à la concrétisation de ce projet.*

*Islam - Anis*

## **DEDICACES**

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, dont l'amour, le soutien et les sacrifices ont été inestimables tout au long de mon parcours académique. Ce travail constitue un humble témoignage de mon affection envers eux. Je n'oublie pas non plus de mentionner mes sœurs et mon frère : Roumaïssa, Imane, Merwa et Loukmane.*

*J'adresse également mes remerciements à mon oncle bien-aimé, Rida Zahir, pour son soutien et sa sagesse.*

*Mes remerciements s'étendent également à mes collègues de la centrale thermique de Jijel : Daoud, Djafar, Omar, Salah, Mohamed, Fayçal et Hamza...*

*Enfin, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien et leur aide tout au long de mes études.*

*Islam*

## **DEDICACES**

*Je dédie modeste travail à mes très chers parents en témoignage de leur amour A qui je porte un grand respect et une profonde et éternelle gratitude. Ainsi j'exprime ma reconnaissance pour leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements au long de mes études, et que ce travail soit pour eux un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse.*

*Sans oublier mes frères : Abderrahim, Ayoub et Mohammed Iyad*

*Et Ma sœur Isra*

*À Mes camarades de la promotion : Electromécanique.*

*À la famille du département électromécanique. À tous ceux qui me sont chers.*

*A toutes personnes qui m'ont encouragé et aidé tout au long de mes études.*

*ANIS*

## Table des matières

Liste des Figures.....	i
Liste des Tableaux.....	ii
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur l'assemblage par sertissage électromagnétique.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Méthodes de formage conventionnel .....	3
I.3. Historique et l'état d'art.....	5
I.3.1. Formage électromagnétique.....	5
I.3.2. Soudage électromagnétique.....	6
I.4. Définition et Principes fondamentaux du procédé de SEM .....	9
I.5. Méthodes d'assemblage électromagnétique .....	10
I.5.1. Soudage par impulsions électromagnétiques .....	10
I.5.2. Méthodes de soudage à haute fréquence.....	12
I.6. Technique de sertissage électromagnétique.....	12
I.7. Eléments constitutifs de l'installation du sertissage électromagnétique.....	15
I.8. Applications industrielles du Sertissage électromagnétique.....	19
I.9. Avantages du sertissage électromagnétique.....	23
I.10. Inconvénients du sertissage électromagnétique.....	24
Chapitre II Modélisation de l'assemblage par sertissage électromagnétique.....	25
II.1 Introduction.....	25
II.2 Phénomènes électromagnétiques.....	25
II.2.1. Equations de Maxwell.....	25
II.2.2. Lois de comportement des milieux.....	26
II.2.3. Propriétés des matériaux .....	28
II.2.4. Conditions aux limites et aux interfaces.....	29
II.2.5. Equation électromagnétique.....	30
II.2.6. Calculs des grandeurs électromagnétiques.....	30
II.2.7 Conditions aux limites.....	31

<b>II.3. Phénomènes Mécanique .....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.1 Equation d'équilibre.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.2 Lois de Hooke.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.3 Relation déformation-déplacement.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.4 Relation contrainte-déformation.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.5 Symétrie axiale.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3.6 Conditions aux limites.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4 Phénomènes thermiques.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.1 Equation thermique.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.2 Conditions aux limites.....</b>	<b>37</b>
<b>II.5. Couplage des diverses équations.....</b>	<b>37</b>
<b>II.5.1. Couplage fort.....</b>	<b>37</b>
<b>II.5.2. Termes de couplage.....</b>	<b>37</b>
<b>II.6. Logiciel de simulation.....</b>	<b>38</b>
<b>II.7. Conclusion.....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE III APPLICATIONS ET RESULTATS.....</b>	<b>39</b>
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2. Simulation d sertissage électromagnétique.....</b>	<b>39</b>
<b>III.3. Inducteurs du SRTEM.....</b>	<b>40</b>
<b>III.4. Matériaux des pièces pour SRTEM.....</b>	<b>41</b>
<b>III.5. Paramètres du processus.....</b>	<b>41</b>
<b>III.6. Sertissage électromagnétique des pièces tubulaires .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6.1. Installation de sertissage de tubes .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6.2. Courant de décharge .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6.3. Résultats numériques.....</b>	<b>43</b>
<b>III.6.4. Etudes paramétriques .....</b>	<b>46</b>
<b>III.7. Sertissage électromagnétique des pièces plates .....</b>	<b>58</b>
<b>III.8. Conclusion .....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>64</b>

## Liste des Figures

<b>Figure I.1:</b> (a) Représentation infographique des formages métalliques et de leurs classifications, (b) configuration du formage EM et (c) divers types de bobines pour le formage EM.....	<b>4</b>
<b>Figure I.2 :</b> (a) Calendrier historique des progrès en matière de FEM, (b) Variation du nombre de publications de recherche liées au FEM au cours des années et dans les pays.....	<b>6</b>
<b>Figure I.3 :</b> Force de Lorentz entre la bobine et les pièces proches.....	<b>10</b>
<b>Figure I.4 :</b> Le diagramme schématique du système SEM.....	<b>11</b>
<b>Figure I.5 :</b> Plate-forme expérimentale du SEM.....	<b>11</b>
<b>Figure I.6 :</b> Le system de soudage à haute fréquence.....	<b>12</b>
<b>Figure I.7 :</b> Vue schématique du processus EMC.....	<b>14</b>
<b>Figure I.8 :</b> Système de sertissage EM (EMC).....	<b>15</b>
<b>Figure I.9:</b> Système d'impulsions électromagnétiques industriel avec bobine circulaire.....	<b>16</b>
<b>Figure I.10:</b> Bobine à plusieurs tours .....	<b>17</b>
<b>Figure I.11:</b> Bobine à un seul tour.....	<b>17</b>
<b>Figure I.12:</b> Bobine plate.....	<b>17</b>
<b>Figure I.13:</b> Concentrateur de champ.....	<b>18</b>
<b>Figure I.14:</b> Schéma d'une bobine solénoïdale avec conformateur de champ et tube : (a) vue d'ensemble, (b) vue de coupe, (c) directions des courants, (d) section croisée.....	<b>18</b>
<b>Figure I.15:</b> Échantillons (a) avant sertissage et (b) après sertissage.....	<b>19</b>
<b>Figure I.16:</b> Quelques domaines d'application du sertissage électromagnétique (1) Industrie automobile, (2) Câbles, (3) Énergie, (4) Échangeurs thermiques, (5) Électroménager, (6) Construction, (7) Aérospatiale, (8) Gaz et fluides.....	<b>20</b>
<b>Figure I.17:</b> Échantillons, (a) tube de couple Boeing 777, (b) axe d'entraînement de 4" pour Ford, et (c) fuseau de haute tension [50], (d) tubes de couple de vol d'aéronef [50], (e) tubes d'exploitation d'avion de contrôle de vol [39], (f) joint entre un axe de traction d'aluminium et un composant en acier ; (g) connexion entre deux éléments d'aluminium dans un filtre à essence ; (h) récepteur de	

climatisation du véhicule ; et (i) connecteur d'atterrissage électrique automobile [35]	21
<b>Figure I.18 :</b> (a) châssis d'entraînement, (b) cadres d'espace produits par EMJ, (c) structure de cadres légers, (d) châssis avec joints soudés et crochés, (e) récipient d'expansion d'huile avec un anneau d'aluminium comprimé [51], (f) tube aluminium/acier, (g) tubes d'accrochage pour la suspension d'air, et (h) assemblage d'axes d'entraînement [52]	22
<b>Figure III.1:</b> Système simulé et installation expérimentale [65-66]	42
<b>Figure III.2 :</b> Courant de décharge.....	43
<b>Figure III.3 :</b> (a) Densité de courant induite à $t=30\mu s$ , (b) Forces magnétiques à $t=30\mu s$ .....	44
<b>Figure III.4 :</b> (a) Déplacement total à $t=30\mu s$ , (b) Distribution de la température à $t=30\mu s$ .....	44
<b>Figure III.5 :</b> (a) Déplacement le long du tube serti à différents instants du sertissage, (b) Distribution de la température à différents instants du sertissage.....	45
<b>Figure III.6 :</b> Points sélectionnés du tube extérieur sertissage.....	46
<b>Figure III.7:</b> (a) Variation de la déformation aux trois nœuds sélectionnés, (b) Variation de la température aux trois nœuds sélectionnés.....	46
<b>Figure III.8 :</b> (a) Déformation le long du tube serti pour différentes combinaisons similaires, (b) Variation dans le temps du déplacement aux points considérés .....	48
<b>Figure III.9 :</b> (a) Température le long du tube serti pour différentes combinaisons similaires, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés.....	48
<b>Figure III.10 :</b> (a) Déformation le long de la longueur du tube serti à différents instants, (b) Variation dans le temps du déplacement des points considérés .....	49
<b>Figure III.11 :</b> (a) Température le long de la longueur du tube serti à différents instants, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés.....	49
<b>Figure III.12 :</b> Formes des trois filetages considérés (triangulaire, contrefort et rond) .....	50
<b>Figure III.13 :</b> (a) Déformation le long du tube serti pour les différents filetages, (b) Température le long de la longueur du tube serti pour les différents filetages.....	51
<b>Figure III.14 :</b> Déformation des systèmes simulés avec différentes longueurs du filetage 20mm, 30mm et 40mm.....	52
<b>Figure III.15 :</b> (a) Déformation le long du tube serti pour les différentes longueurs du filetage, (b) Variation dans le temps du déplacement des points considérés.....	52

<b>Figure III.16 :</b> (a) Température le long du tube serti pour les différentes longueurs du filetage, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés.....	<b>53</b>
<b>Figure III.17 :</b> Déformation des différents systèmes simulés avec différents pitch de différentes largeurs 1mm, 2.5mm et 3mm.....	<b>54</b>
<b>Figure III.18 :</b> (a) Déformation le long du tube serti pour différentes largeurs du pitch, (b) Température le long du tube serti pour différentes largeurs du pitch.....	<b>54</b>
<b>Figure III. 19 :</b> (a) Déformation le long du tube serti pour les différentes énergies, (b) Variation dans le temps de la déformation des points considérés pour les différents courants extérieurs.....	<b>55</b>
<b>Figure III. 20 :</b> (a) Température pour les différents courants, (b) Variation dans le temps de la température aux points considérés pour les différentes énergies.....	<b>56</b>
<b>Figure III.21 :</b> (a) Déformation totale obtenue avec l'inducteur spiral. (b) Température du tube serti obtenue en utilisant l'inducteur spiral.....	<b>57</b>
<b>Figure III.22 :</b> (a) Déformation le long du tube serti avec inducteur spiral, (b) Variation dans le temps de la température le long du tube serti avec inducteur spiral.....	<b>57</b>
<b>Figure III.23 :</b> (a) Déplacement le long du tube serti avec inducteur massif et spiral, (b) Température le long du tube serti avec inducteur massif et spiral.....	<b>57</b>
<b>Figure III.24 :</b> (a) Installation de SRTEM de plaque, (b) Courant inducteur considéré dans la simulation .....	<b>58</b>
<b>Figure III.25 :</b> (a) Sertissage de la plaque en aluminium, (b) Sertissage de la plaque en cuivre, (c) Sertissage de la plaque en magnésium .....	<b>59</b>
<b>Figure III.26 :</b> (a) Déplacement le long du rayon de la plaque en Aluminium, (b) Déplacement de la plaque en Cuivre, (c) Déplacement de la plaque en Magnésium, (d) Déplacement dans le temps du milieu des plaques.....	<b>60</b>
<b>Figure III.27 :</b> (a) Température de la plaque en Aluminium, (b) Température de la plaque en Cuivre, (c) Température de la plaque en Magnésium, (d) Comparaison de la température du milieu des trois plaques.....	<b>61</b>

## **Liste des Tableaux**

<b>Tableau III.1</b> : Spécifications des inducteurs utilisés dans les simulations.....	<b>41</b>
<b>Tableau III.2</b> : Propriétés physiques des matériaux utilisés.....	<b>42</b>

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

L'assemblage par sertissage électromagnétique incarne une percée technologique dans le domaine de la fabrication, offrant une méthode d'union des matériaux sans égale en termes de précision, de rapidité et de fiabilité. Cette technique moderne utilise des champs magnétiques pour déformer et assembler des pièces métalliques, sans nécessiter de contact direct ni d'apport thermique, ce qui la rend particulièrement adaptée aux matériaux sensibles à la chaleur ou aux combinaisons de matériaux hétérogènes.

Le sertissage électromagnétique se distingue par sa capacité à produire des composants aux géométries complexes et aux compositions variées, y compris avec des matériaux de haute résistance ou de faible ductilité. Ce procédé d'assemblage à froid exploite les forces de Lorentz pour déformer les pièces métalliques, permettant ainsi de créer des liaisons solides entre des matériaux même dissimilaires, et ce, à une vitesse impressionnante. Cette méthode est devenue un choix privilégié pour de nombreuses industries en quête d'efficacité et de précision, notamment dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale.

La modélisation numérique joue un rôle crucial dans l'optimisation du sertissage électromagnétique, permettant aux ingénieurs de simuler et de perfectionner le processus avant la production réelle. Des outils avancés de simulation, tels que ceux offerts par l'environnement COMSOL, sont utilisés pour prédire avec précision les performances des assemblages et pour concevoir des solutions adaptées aux défis spécifiques de chaque application.

Ce mémoire présente une analyse approfondie du sertissage électromagnétique, en décrivant ses principes et phénomènes physiques, ainsi qu'une évaluation paramétrique des équipements et des composants utilisés. Il explore également plusieurs études et applications industrielles du sertissage électromagnétique, fournissant des exemples simulés numériquement qui mettent en évidence les avantages de ce processus. Les résultats obtenus par simulation sont corroborés par des données expérimentales, confirmant ainsi la validité des modèles.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons structuré notre exploration du sertissage électromagnétique en trois chapitres distincts, chacun abordant des facettes différentes de cette technologie d'assemblage innovante.

Dans le premier chapitre, nous dévoilons les aspects théoriques et pratiques du sertissage électromagnétique. Nous y décrivons les caractéristiques essentielles de ce procédé et ses

applications variées, en mettant un accent particulier sur celles qui sont prédominantes dans l'industrie. Ce chapitre sert de fondation à notre étude, établissant le contexte dans lequel le sertissage électromagnétique opère et les principes qui le régissent.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'assemblage par sertissage électromagnétique. Ici, nous plongeons dans les modèles mathématiques qui capturent les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques impliqués, et comment leur interaction est cruciale pour le développement des outils numériques. Ces outils, développés sous l'environnement COMSOL Multiphysics, permettent de simuler avec précision les processus d'assemblage et d'anticiper les résultats avant même la mise en œuvre pratique.

Enfin, le troisième chapitre applique ces modèles à des installations industrielles concrètes, analysant et interprétant les résultats numériques obtenus. Nous explorons des cas d'expansion et de compression de tubes ainsi que le formage de pièces plates par impulsion magnétique, démontrant la robustesse et la polyvalence du sertissage électromagnétique. Ce chapitre illustre non seulement les avantages de cette méthode mais aussi sa capacité à s'adapter à divers défis de fabrication. En outre, des études paramétriques ont été menées, afin d'étudier l'influence de certains paramètres géométriques et physiques sur ce processus et son efficacité.

En conclusion, ce mémoire offre un aperçu exhaustif du sertissage électromagnétique, propose des recommandations pour des recherches futures et envisage des améliorations potentielles pour les modèles numériques existants (géométries complexes, modèles tridimensionnels et effet d'autres paramètres telle que la fréquence du générateur), ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées dans ce domaine fascinant. Les perspectives offrent de nouvelles possibilités d'amélioration de nos modèles numériques, promettant des avancées significatives dans les techniques d'assemblage industriel.

# Chapitre I

## Chapitre I Généralités sur l'assemblage par sertissage électromagnétique

### I.1 Introduction

Les technologies de fabrication visant le développement durable et l'utilisation efficace des hommes, des matériaux et de l'énergie disponible sont de plus en plus demandées. Plusieurs pièces complexes doivent être jointes dans diverses industries, telles que l'automobile, l'aérospatiale, le nucléaire, le médical et l'électronique, qui exigent des performances spéciales comme la résistance à la corrosion ou à l'usure, la résistance à haute température et la ténacité, combinées à une résistance élevée. Par rapport au poids. Ces applications nécessitent une flexibilité de conception et l'assemblage de matériaux avec différents comportements chimiques, mécaniques et thermiques.

L'assemblage de matériaux différents est souvent extrêmement difficile à réaliser par les techniques d'assemblage conventionnelles en raison de l'incompatibilité thermique et métallurgique. Par exemple, si les températures de fusion et la conductivité thermique des matériaux à assembler sont significatives, le soudage par fusion ne peut pas être pratiqué en général en raison de l'accumulation de contraintes internes dans les zones intermétalliques, ce qui réduit davantage la résistance du joint et permet d'obtenir une résistance comparable à celle du métal de base, un traitement thermique ultérieur peut être essentiels, comme le décrivent Kang et al. [1] Cependant, l'assemblage par des techniques comme le formage du métal peut être proposé comme une alternative verte durable pour la fabrication de composants légers multi-matériaux pour relever ces défis contemporains [2, 3]. Ce travail élabore le cadre avec cette proposition, issue du formage du métal, en particulier du formage électromagnétique (FEM) et approfondit la nécessité et la signification de l'assemblage par sertissage électromagnétique en particulier pour les composants tubulaires multi-matériaux.

### I.2. Méthodes de formage conventionnel

La figure I.1 (a) présente des détails sur les procédés de formage des métaux englobant le formage conventionnel des métaux (CMF) et le formage à haute énergie (HERF). Le CMF, utilisant un système de poinçon et de matrice, implique des opérations telles que le laminage, le forgeage, le pliage et l'extrusion, caractérisées par des temps de fonctionnement plus élevés et des élastiques notables. En revanche, HERF, avec des vitesses de déformation autour de 1000/s, comprend des méthodes comme le formage explosif (EXF), le formage électrohydraulique (EHF) et le formage électromagnétique (EMF).

Le Formage électromagnétique, tel que discuté par Daehn et al. [3] et Kumar et al. [4], réalise

une déformation sans contact des matériaux conducteurs à l'aide d'un champ électromagnétique contrôlé par l'énergie déchargée d'une batterie de condensateurs comme le montre la Fig. I.1(b).

Le principe de fonctionnement détaillé a été discuté en détail par Psyk et al. [5]. Le procédé FEM peut être classé en trois catégories en fonction de l'arrangement de la bobine et de la pièce : (i) compression EM, (ii) expansion EM et (iii) formage EM de tôle [6, 7]. La figure I. 1 (c) montre que la compression et l'expansion électromagnétiques utilisent une bobine hélicoïdale pour former des composants tubulaires axisymétriques tandis que le formage de tôle utilise une bobine spirale.

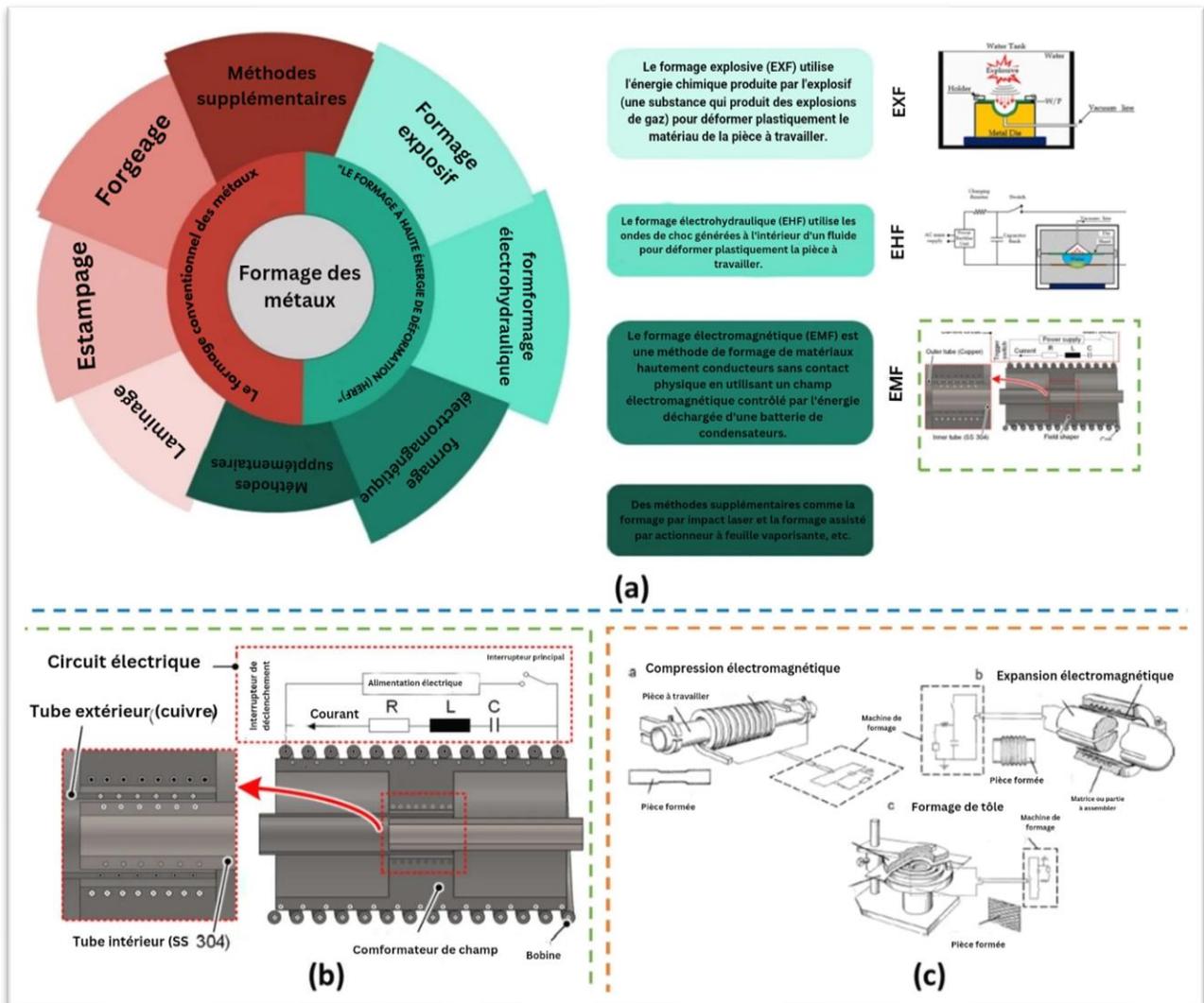


Figure I.1:( a) Représentation infographique des formages métalliques et de leurs classifications, (b) Configuration du formage EM et (c) Divers types de bobines pour le formage EM

### I.3. Historique et l'état d'art

#### I.3.1. Formage électromagnétique

Bien que les principes sous-jacents du formage électromagnétique soient connus depuis près d'un siècle, son adoption industrielle a été nettement retardée, ne gagnant en popularité qu'à la fin du XXe siècle. Cette tendance est évidente dans le paysage de la recherche, comme l'illustre la figure **I.2 (a)**.

Bien que la chronologie présentée ne soit pas exhaustive, elle offre un aperçu représentatif de l'évolution de la recherche sur le processus du FEM. Notamment, les deux dernières décennies ont vu une augmentation exponentielle des enquêtes scientifiques dans ce domaine.

La disponibilité des systèmes de calcul haute performance et de contrôle avancé des processus a sans aucun doute alimenté cette croissance, permettant aux chercheurs d'approfondir les subtilités du FEM et de libérer tout son potentiel au point où 84 % des publications ont été publiées depuis 2010, comme le montre la figure **I. 2(b)**. Il est basé sur les données de Scopus et dresse un tableau complet de la répartition en pourcentage de la recherche sur le FEM dans divers domaines, soulignant l'ampleur des applications poursuivies en réponse à des demandes spécifiques.

Cette croissance spectaculaire reflète un intérêt croissant et la reconnaissance de l'immense potentiel de ce procédé pour révolutionner les avancées scientifiques et technologiques dans un large éventail de disciplines.

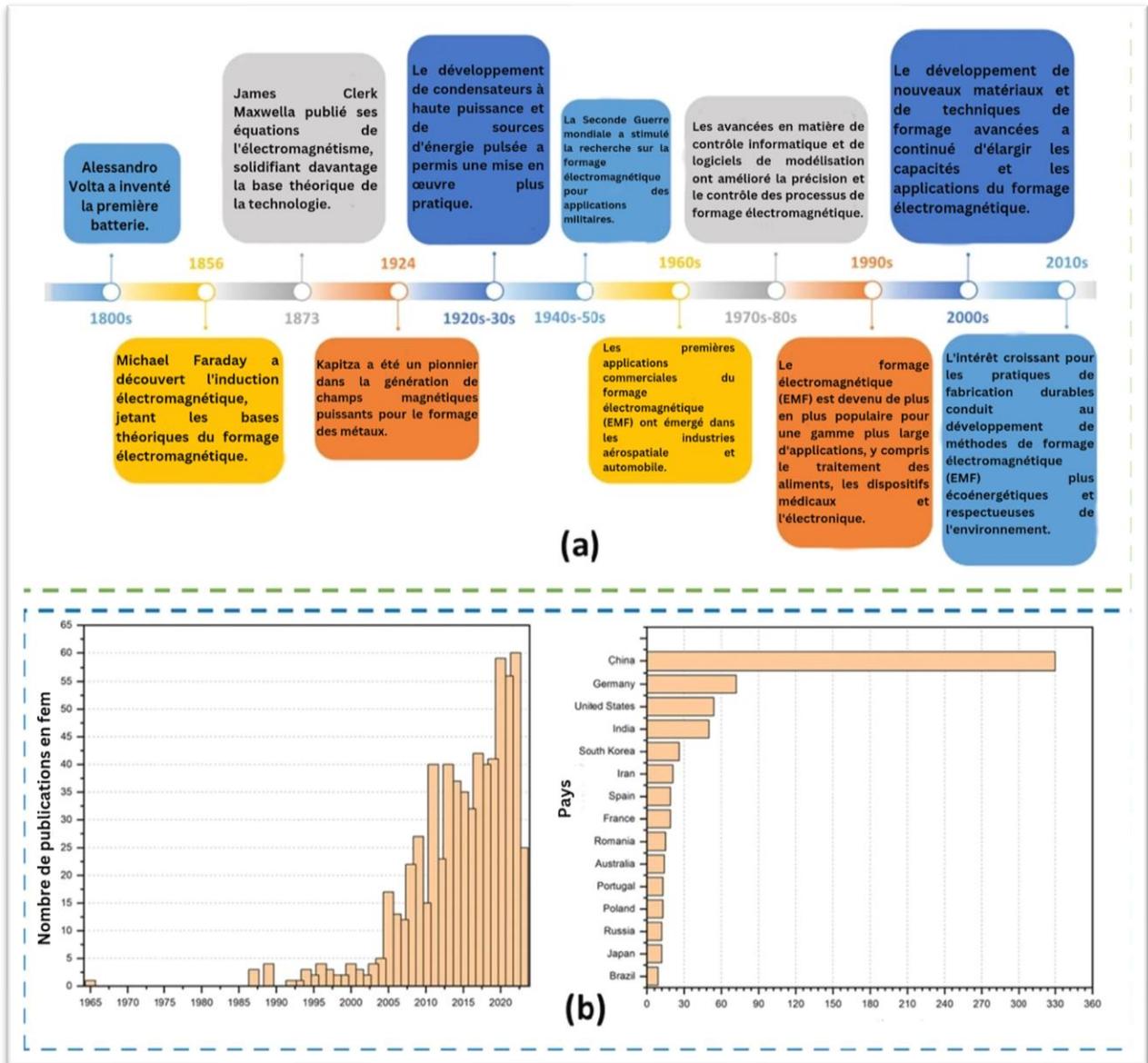


Figure I.2: (a) Calendrier historique des progrès en matière de FEM, (b) Variation du nombre de publications de recherche liées au FEM au cours des années et dans les pays

### I.3.2. Soudage électromagnétique

Le développement historique du soudage électromagnétique (SEM) a connu des progrès significatifs au fil des ans. Le concept de soudage électromagnétique remonte à la fin des années 1800, quand il a été initialement développé comme une méthode de formation de feuilles métalliques. Au début des années 1900, la découverte de l'acétylène et le développement du

générateur électrique ont conduit à l'invention de la soudure à gaz et de la coupe, ce qui a fait progresser le domaine de la soudure.

Au milieu du siècle, de nombreuses nouvelles méthodes de soudage ont été inventées, notamment le soudage à arc sous-marin en 1930, la soudure à arc électrique sous l'eau en 1932, le soudage à l'arc sous gaz inerte avec électrode (infusible) de tungstène en 1941, et le soudage à l'arc métallique sous gaz, qui a été mis au point en 1948 [8]. Les années 1950 ont vu l'introduction du soudage à l'arc à l'électrode enrobée, et l'apparition de la technique de soudage à l'arc de plasma en 1957. Un an plus tard, le soudage vertical sous gaz ou ElectroSlag Welding (ESW) et le soudage électro gaz ont été lancés en 1958 et 1961, respectivement [8].

Dans les années 1970, l'industrie automobile a commencé à utiliser la soudure à l'état solide, ce qui a conduit au développement du soudage à impulsion magnétique [8]. Le SEM est un processus de soudage à l'état solide qui utilise des forces magnétiques pour souder deux pièces ensemble, évitant la formation de phases intermétalliques fragiles et permettant la soudure de métaux différents [9].

Ces dernières années, les progrès technologiques ont fait du SEM une solution de pointe pour unir des matériaux différents de manière efficace. Il est utilisé dans l'assemblage de véhicules électriques pour relever des défis tels que l'attachement de métaux différents et le raccordement de grands terminaux à des câbles épais [10]. Malgré ses limites en termes de géométrie des pièces et de coûts d'investissement initiaux, le SEM demeure une technique de soudage de pointe avec des applications prometteuses dans diverses industries [10].

Le soudage magnétique a été appliqué à la fois aux tubes et aux tôles. L'utilisation de forces magnétiques pour assembler des tubes et des feuilles a été brevetée pour la première fois par Lysenko et al. (1970).

Avec l'avancement récent du processus, le soudage de pièces cylindriques axisymétriques a été rendu possible, il a été établi par de nombreux chercheurs [11-12-13-21].

En 2011, le développement de la technologie des impulsions électromagnétiques a permis l'assemblage adhésif de métaux en feuilles dissemblables, tels que l'aluminium et l'acier à haute résistance, dans des conditions industrielles [13]. La même année, le développement d'un dispositif du SEM pour les feuilles isolantes a amélioré l'efficacité du travail et la sécurité lors de la construction de tunnels.

En 2012, la recherche s'est concentrée sur les effets des forces EM sur les phénomènes de transport et la qualité du soudage laser, avec des modèles mathématiques utilisés pour étudier le transfert de chaleur et le flux du métal fondu [14]. La même année, la 13<sup>ème</sup> Conférence internationale MCWASP XIII s'est tenue, présentant les derniers développements en matière de modélisation et les applications dans les processus métallurgiques [15].

En 2013, des conceptions analytiques et des implémentations d'actionneurs de pression uniforme pour le FEM et le SEM ont été présentées, améliorant l'efficacité et la répétabilité de la mise en forme [16].

En 2014, une recherche sur le soudage de métaux dissemblables a été publiée, mettant en évidence les défis du SEM de ces matériaux et la nécessité de recherches supplémentaires [17].

En 2017, une revue sur l'effet du soudage sur la corrosion des alliages de magnésium a été publiée, se concentrant sur les techniques de soudage par friction malaxage et laser [18].

En 2018, une recherche sur la prédiction de l'effet des conformateurs de champs dans le SEM a été publiée, améliorant encore l'efficacité et la répétabilité du processus [19].

La recherche de 2019-2020 s'est focalisée sur les mécanismes fondamentaux du soudage électromagnétique. Une étude de 2020 a montré que les interactions entre champs électromagnétiques et matériaux influencent la qualité des soudures. Les chercheurs ont utilisé des modèles numériques et des expériences empiriques pour optimiser les paramètres de soudage, révélant que le contrôle précis de ces paramètres améliore les propriétés mécaniques des joints soudés, ouvrant de nouvelles perspectives industrielles. [20].[21]

Entre 2021 et 2022, le développement d'équipements de soudage électromagnétique (SEM) plus sophistiqués a permis un meilleur contrôle du processus. Des innovations telles que des conceptions améliorées de bobines électromagnétiques, notamment des bobines en forme de O et multicouches, ont amélioré la distribution du champ électromagnétique et la qualité des soudures en réduisant l'énergie de décharge nécessaire [22]. De plus, des études ont exploré la dynamique de diffusion atomique et les mécanismes de liaison dans le soudage par impulsions électromagnétiques, offrant de nouvelles perspectives pour le soudage de matériaux dissemblables [23]

Des études récentes [24] se sont concentrées sur la modélisation multi-physique pour capturer de manière plus précise les interactions complexes dans les processus de soudage par impulsion magnétique (SEM). Ces modèles intègrent les aspects électromagnétiques, thermiques et

mécaniques, offrant ainsi une compréhension complète du processus de soudage. De plus, des algorithmes évolutionnaires ont été utilisés pour optimiser les paramètres de soudage, ce qui a permis d'améliorer la qualité des jonctions comme l'aluminium-acier [25-26-27-28].

#### I.4. Définition et Principes fondamentaux du procédé de SEM

Le soudage électromagnétique est une technique d'assemblage à grande vitesse qui est utilisée pour joindre des matériaux similaires ou dissimilaires, ainsi que des métaux aux non-métaux. Cette technique utilise la force électromagnétique pour joindre principalement des matériaux conducteurs. Contrairement aux procédés d'assemblage conventionnels et grâce à une vitesse de déformation extrêmement élevée, la technique de SEM est particulièrement efficace pour l'assemblage de divers matériaux.

Selon la loi de Faraday, un conducteur électrique produit un champ magnétique transitoire et induit un courant dans l'objet conducteur voisin lorsqu'il est chargé par un courant variant dans le temps. La loi de Lenz stipule que le courant induit s'oppose toujours à son origine et produit ainsi des champs magnétiques dans la direction opposée. Par conséquent, une force de Lorentz répulsive (Figure I.3) sera établie entre les deux objets conducteurs voisins lorsqu'ils sont chargés par un courant dans la direction opposée. Le SEM utilise ces principes et convertit le courant de décharge dans la bobine en force mécanique utile pour l'opération d'assemblage ou de formage.

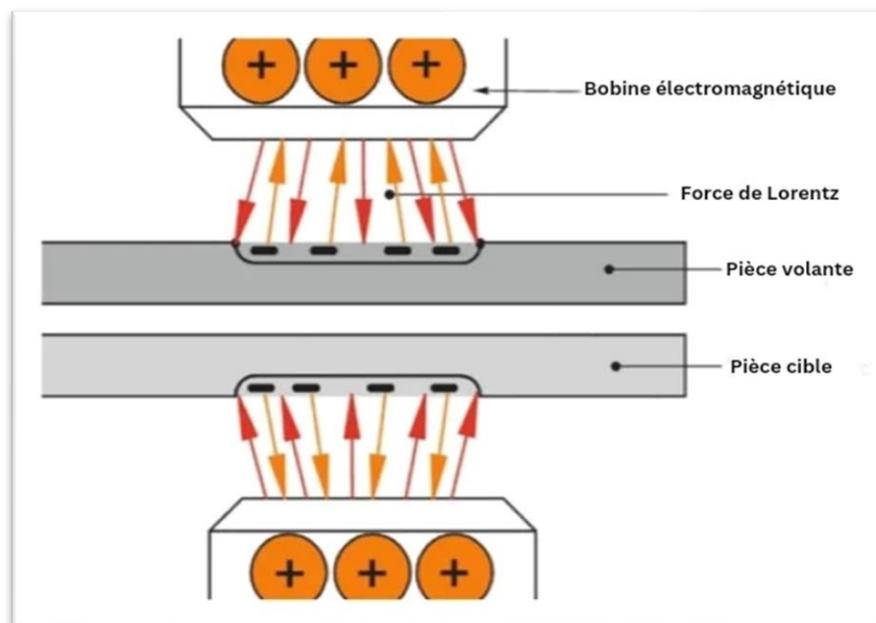


Figure I.3: Force de Lorentz entre la bobine et les pièces proches

## I.5. Méthodes d'assemblage électromagnétique

### I.5.1. Soudage par impulsions électromagnétiques

La technologie de soudage par impulsions électromagnétiques (SEM) est l'une des applications des technologies de puissance par impulsions utilisées dans la fabrication de matériaux. Elle est différente des technologies de soudage traditionnelles et le processus peut être divisé en trois étapes : La charge, l'étape de décharge et processus de soudage.

L'alimentation électrique charge la batterie de condensateurs pendant le processus de charge. Ensuite, un fort courant se décharge du banc de capacités et circule dans la bobine de soudage. Le processus de soudage comprend la production du champ magnétique variable dans le temps, des courants de Foucault, de la force de Lorentz et du soudage de la pièce.

Cette technologie peut surmonter les différences de caractéristiques entre les métaux dissimilaires car elle utilise la grande force de Lorentz sans chauffage externe. Elle possède plusieurs avantages, particulièrement sa rapidité et son rendement élevé [29], en plus de son utilisation potentielle dans les domaines de l'industrie électronique [30], automobile [31], nucléaire [32,33] et aérospatiale [34,35].

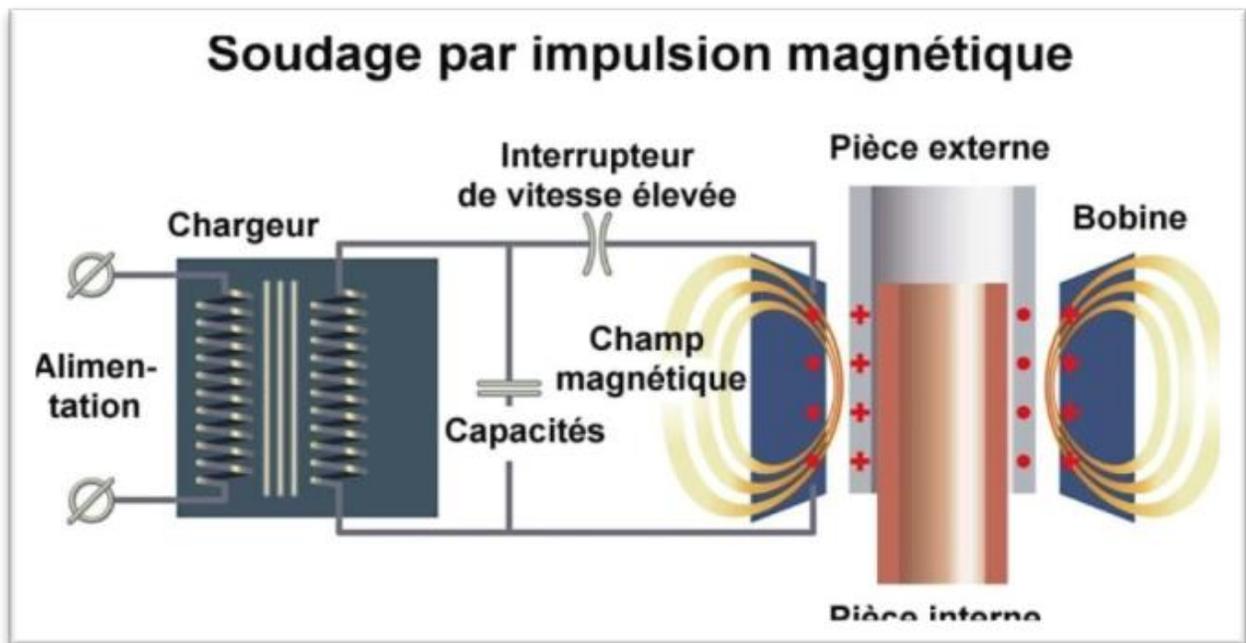
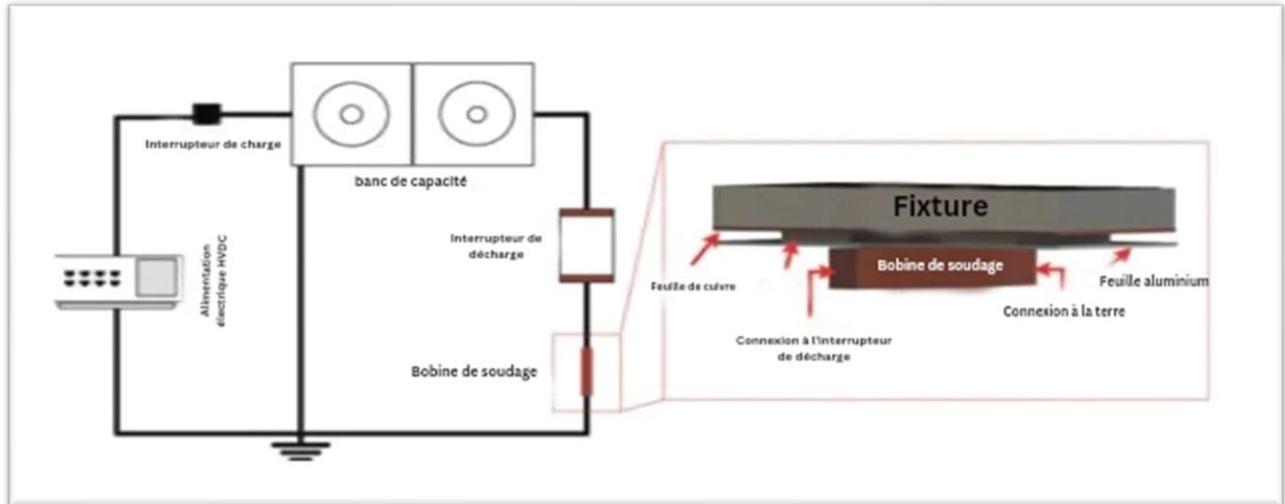


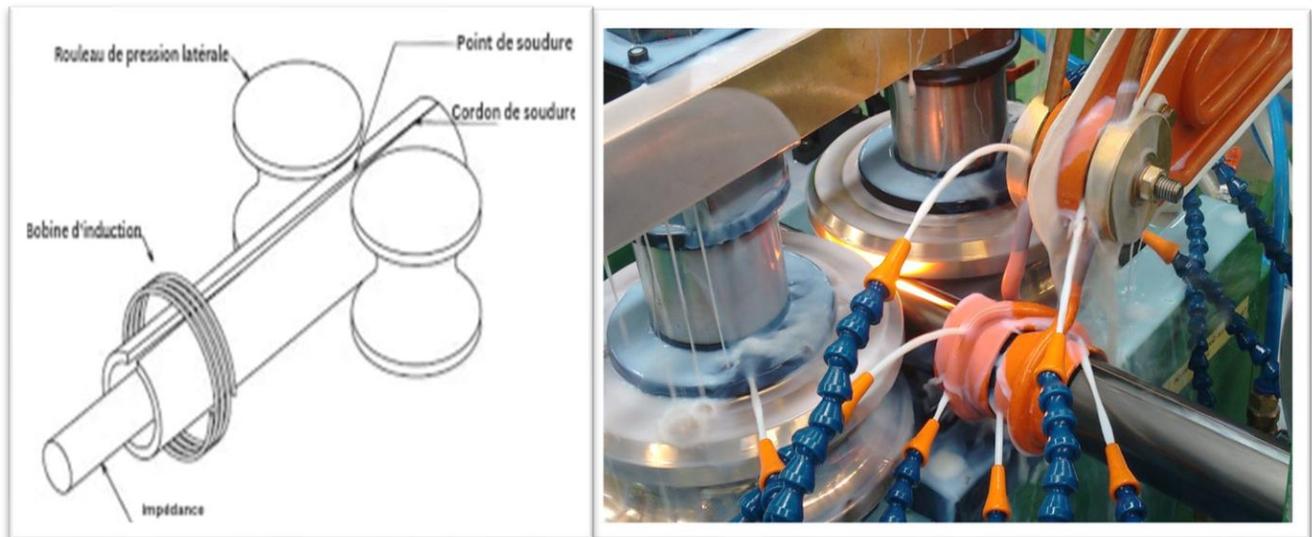
Figure I.4: Le diagramme schématique du système de SEM



**Figure I.5: Plate-forme expérimentale du SEM**

### I.5.2. Méthode de soudage à haute fréquence

Le soudage à haute fréquence est une méthode de soudage sous pression pour la liaison métallique qui utilise un courant à haute fréquence pour chauffer la surface des pièces métalliques à souder à un état thermoplastique ou partiellement fondu sous pression mécanique externe. Le principe du soudage à haute fréquence consiste à concentrer le courant sur la surface de la pièce en utilisant le chemin avec la réactance inductive minimale et en dirigeant le courant le long de la surface du conducteur, en réglant le chemin de conduction, position, et la gamme du courant à haute fréquence pour chauffer rapidement la surface de la pièce à la température requise. En déformant l'interface adjacente de la zone à haute température à souder par extrusion mécanique, la liaison atomique ou moléculaire est réalisée, de manière à réaliser le soudage. La gamme de fréquences couramment utilisée dans le soudage à haute fréquence est de 60 à 500 kHz [36].



**Figure I.6 : Le système de soudage à haute fréquence**

## **I.6. Technique de sertissage électromagnétique**

Dans un monde où la fiabilité et la durabilité des assemblages sont essentielles, le sertissage est une technique d'assemblage et de soudage qui a prouvé son efficacité dans divers domaines, allant de l'industrie aéronautique à l'automobile et à la construction. En permettant de créer des unions solides et résistantes entre des matériaux, le sertissage est devenu un outil indispensable pour les ingénieurs et les techniciens qui cherchent à améliorer la performance et la sécurité de leurs produits.

### **I.6.1. Définition et propriétés**

Le sertissage est utilisé pour créer une jonction étroite et sécurisée entre deux matériaux, généralement des tubes métalliques, des barres ou des tuyaux [37]. Une bobine primaire conductrice est utilisée pour générer un champ magnétique en déchargeant un courant électrique amorti sinusoïdal à haute fréquence à travers la zone adjacente de l'inducteur à la pièce considérée [38]. Les courants induits causés par le champ magnétique dans la pièce engendrent une pression d'impact, une force de Lorentz, un réchauffement localisé et un adoucissement, ce qui permet de raccrocher les matériaux et de créer un joint solide [39].

Les joints multi-matériaux sont très demandés en raison de leurs caractéristiques de substitution [40].

Le sertissage électromagnétique est couramment utilisé pour combiner des matériaux tels que l'aluminium, le cuivre, le nickel et le titane, qui ont des propriétés mécaniques et thermiques différentes [41].

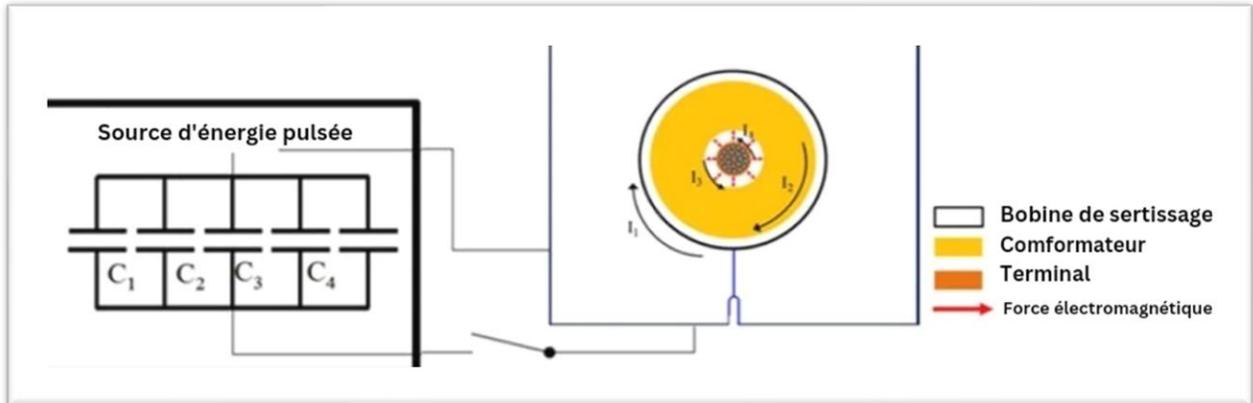
### I.6.2. Processus de sertissage électromagnétique

Le processus de sertissage EM (Electromagnetic crimping EMC) est une méthode de soudage à haute vitesse qui emploie une force magnétique ; par conséquent, le système de sertissage se compose d'une source de puissance d'impulsions, d'une bobine, d'un concentrateur de champ et des pièces à sertir. La figure I.7 montre que la source de puissance se décharge instantanément, ce qui entraîne le passage d'un courant primaire de haute fréquence dans la bobine inductrice (I1). Les sources de puissance sont souvent classées en fonction de leur capacité de stockage d'énergie et de leur énergie de charge donnée par (I.1) [42].

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

Où E et C représentent l'énergie de charge et la capacité totale, et V est la tension de charge.

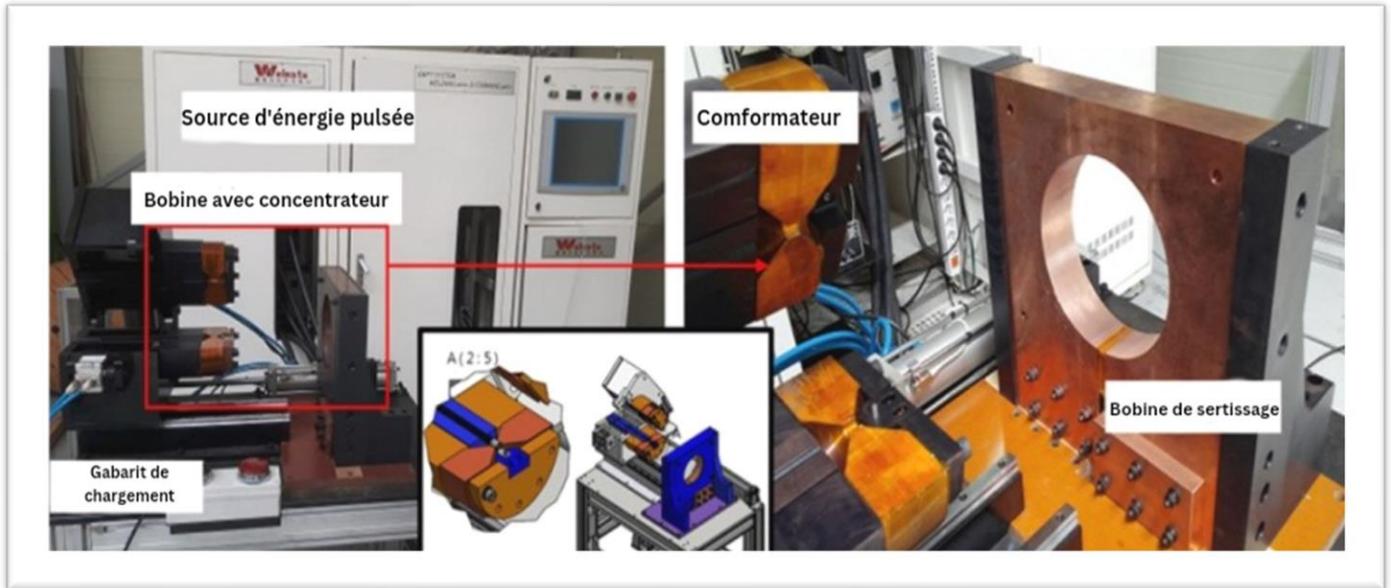
Le courant I1 induira le courant secondaire I2 dans le concentrateur et ce I2 s'écoule à travers la surface extérieure du concentrateur vers la surface intérieure comme I3. Enfin, I4 est induit sur la surface de la pièce. Les champs électromagnétiques élevés entre la surface interne du concentrateur et la surface externe génèrent des forces magnétiques élevées, permettant la compression de la pièce qui est sertie (figure I.7).



**Figure I.7 : Vue schématique du processus EMC**

En général, l'installation de sertissage EM est formée de :

- Un générateur composé de plusieurs condensateurs (banc de capacités) qui permet la décharge de l'énergie électrique dans la bobine inductrice.
- Une bobine qui a une forme qui varie en fonction de l'opération de formage et qui est capable de supporter ce courant de décharge et les tensions magnétiques qui en découlent.
- Un concentrateur de champ, permettant la concentration du champ magnétique au niveau de la partie désirée (à sertir).
- Des pièces à souder en matériaux conducteurs tel que l'aluminium, le laiton, l'argent, cuivre etc.



**Figure I.8: Système de sertissage EM (EMC)**

## **I.7. Eléments constitutifs de l'installation du sertissage électromagnétique**

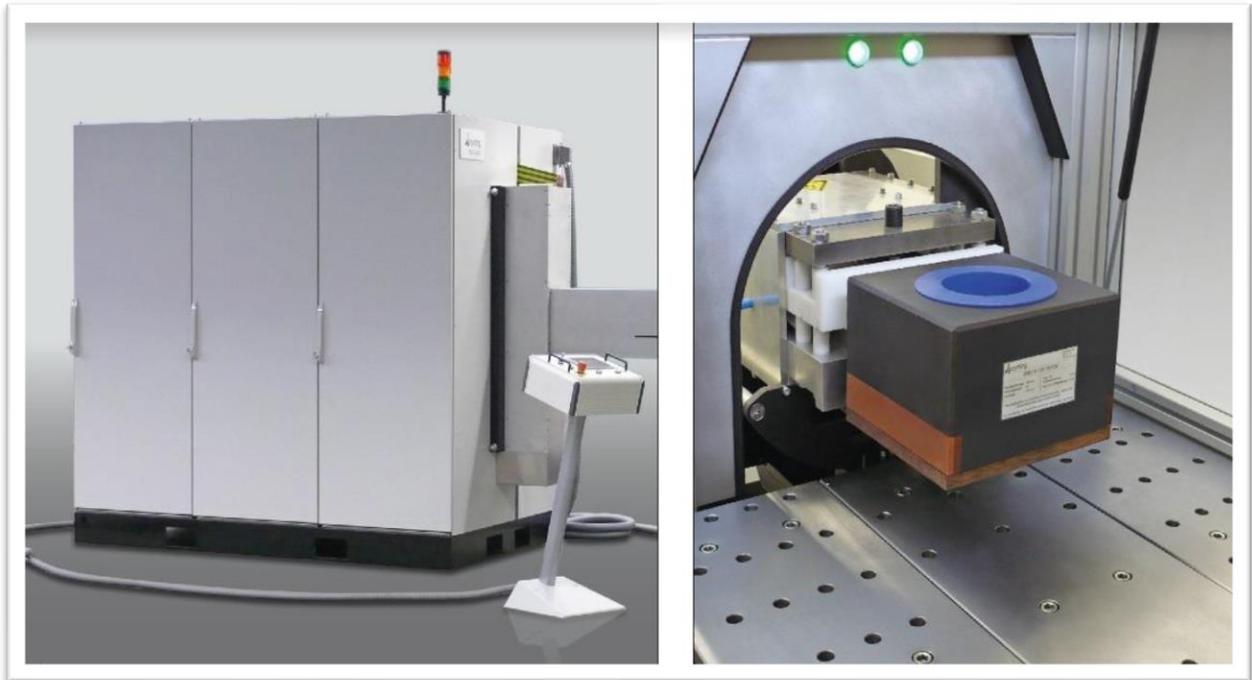
### **I.7.1. Générateurs**

Ce sont des dispositifs capables de générer des impulsions électriques d'une puissance de plusieurs centaines de kilo ampères, à des tensions de plusieurs kilovolts et d'une durée de quelques centaines de microsecondes, avec des cadences de production industrielles. On obtient ces impulsions électriques en déchargeant un banc de condensateurs

Au préalable, les condensateurs du générateur d'impulsion sont chargés. Ensuite, on ferme un interrupteur de courant élevé, permettant aux condensateurs de se décharger de manière sinusoïdale, ce qui génère, dans la bobine un fort courant pulsatoire [12]. L'énergie du banc de capacités augmente en fonction de la tension selon l'équation (I.1).

Un générateur est constitué d'un dispositif de contrôle qui émet une tension initiale qui augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur souhaitée. Les capacités d'un générateur d'impulsions électriques sont déterminées par le constructeur et par les capacités de décharge.

Ainsi, l'utilisation de la bobine créatrice de champ détermine la fréquence d'oscillation et le courant dans le circuit.



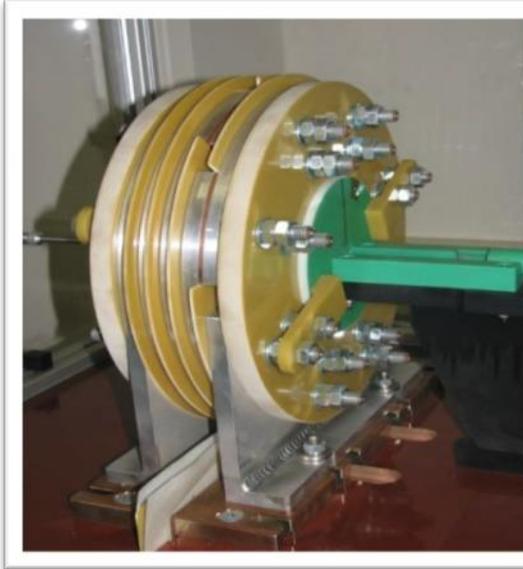
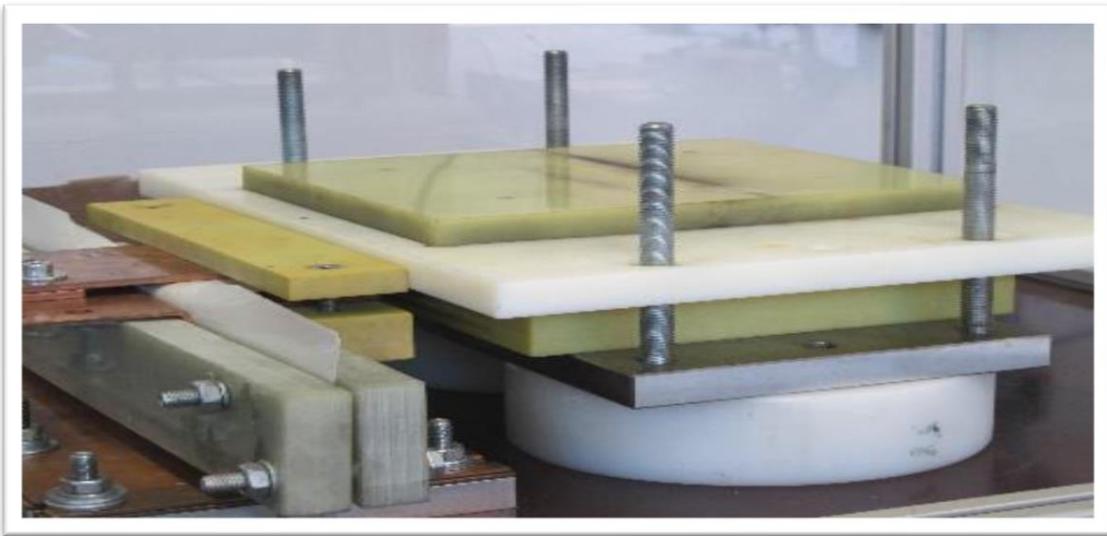
**Figure I.9: Système d'impulsions électromagnétiques industriel avec bobine circulaire**

### **I.7.2. Bobines inductrices**

Bien que la conception de la bobine puisse sembler facile, il y a plusieurs éléments qui peuvent entraîner des difficultés [43]. On se sert des bobines et des concentrateurs de champ afin de concentrer la pression magnétique sur une zone spécifique des pièces considérées.

Une bobine circulaire est constituée de deux ou plusieurs bobines électriques et est fabriquée à partir d'un matériau très conducteur, habituellement un alliage spécial de cuivre ou d'aluminium.

Il est possible d'utiliser des bobines à tour unique (figure I. 10) ou des bobines multi-tours (figure I. 11). Des bobines plates peuvent être utilisées pour le sertissage de tôles (figure I. 12).

**Figure I.10 : Bobine à plusieurs tours****Figure I.11 : Bobine à un seul tour****Figure I.12: Bobine plate**

### I.7.3. Concentrateur de Champ

Le conformateur (ou concentrateur) de champ est une méthode attrayante qui a fait son apparition dans les années 60. Utilisé particulièrement pour la compression, ce cylindre conducteur est évidé, avec des dimensions intérieures qui correspondent à celles de la pièce à déformer et un diamètre qui glisse simplement dans le diamètre intérieur de la bobine de compression [44]. Comme son nom l'indique, la présence d'un concentrateur à l'intérieur de la bobine permet de

concentrer le champ sur une surface plus petite, ce qui entraîne un champ magnétique plus élevé à l'intérieur de l'inducteur, et entraîne une pression magnétique plus importante sur le tube de sertissage [45].

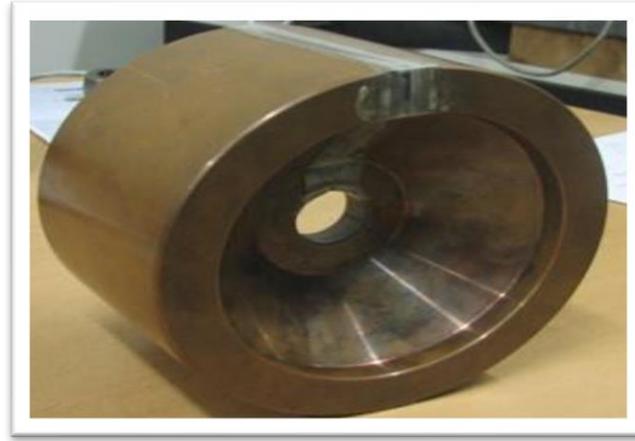


Figure I.13: concentrateur de champ

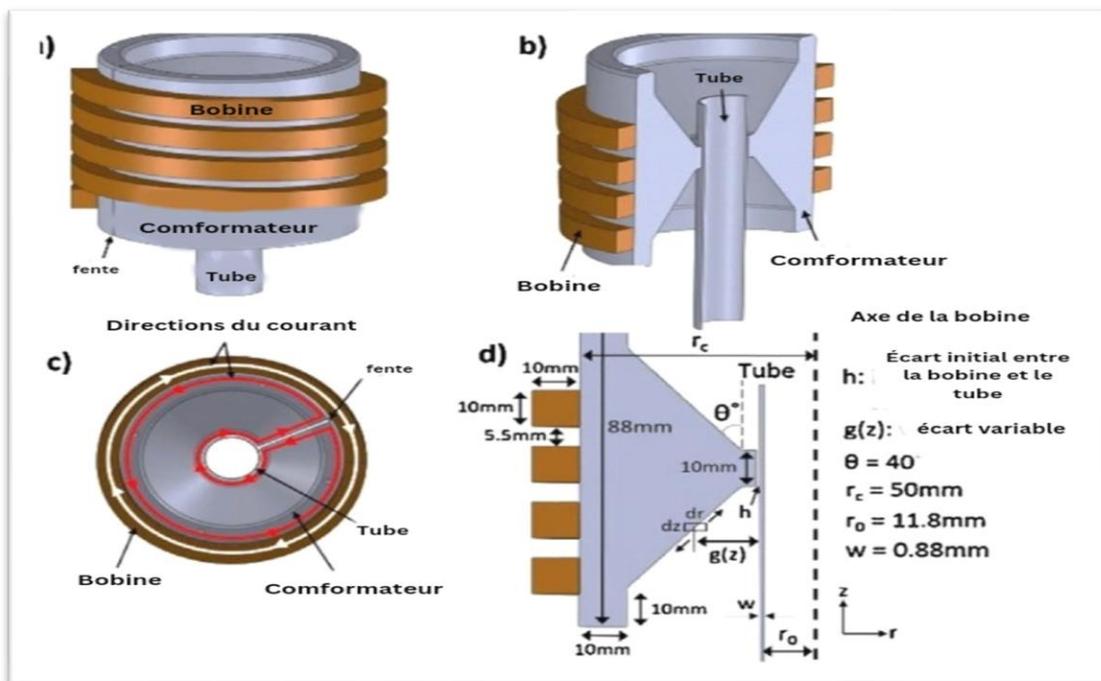


Figure I.14: Schéma d'une bobine solénoïdale avec conformateur de champ et tube : (a) vue d'ensemble, (b) vue de coupe, (c) directions des courants, (d) section croisée

## I.8. Applications industrielles du Sertissage électromagnétique

De nos jours, on peut observer l'emploi du Sertissage EM dans divers domaines tels que l'industrie automobile ou l'énergie électrique.

Les joints d'aluminium sont largement utilisés dans les applications aéronautiques, y compris les lignes de carburant, hydrauliques, conduites d'air et composants structurels, en raison de leur durabilité et de leur conception légère (Figure I-15) [46].

Les joints de matériaux dissimilaires sont couramment utilisés dans l'industrie automobile pour les composants de carburants, de réfrigération, d'échappement et de suspension afin d'assurer des connexions solides [47]. Les joints d'aluminium sont essentiels dans les industries d'énergie renouvelable telles que les turbines éoliennes et les cadres de panneaux solaires [48], ainsi que dans les équipements sportifs tels que les vélos, les clubs de golf et les barres de pêche [49].

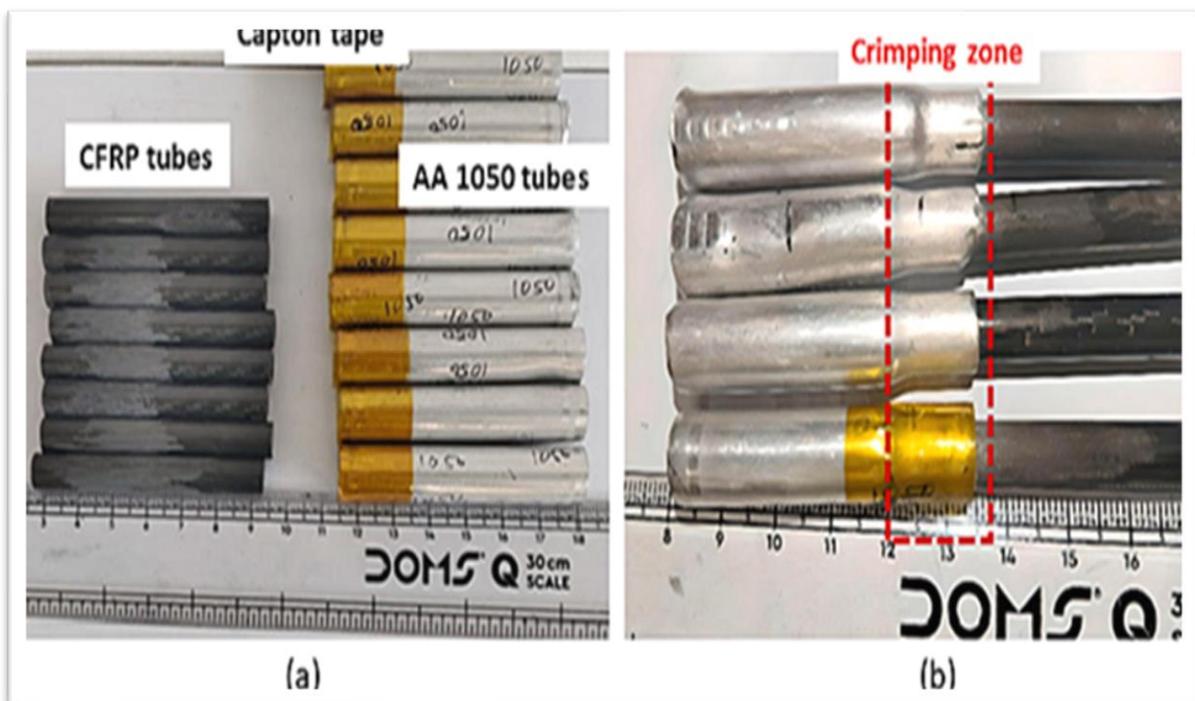


Figure I.15: Échantillons (a) avant sertissage et (b) après sertissage.



**Figure I.16: Domaines d'application du sertissage électromagnétique (1) Industrie automobile, (2) Câbles, (3) Énergie, (4) Échangeurs thermiques, (5) Électroménager, (6) Construction, (7) Aérospatiale, (8) Gaz et fluides**

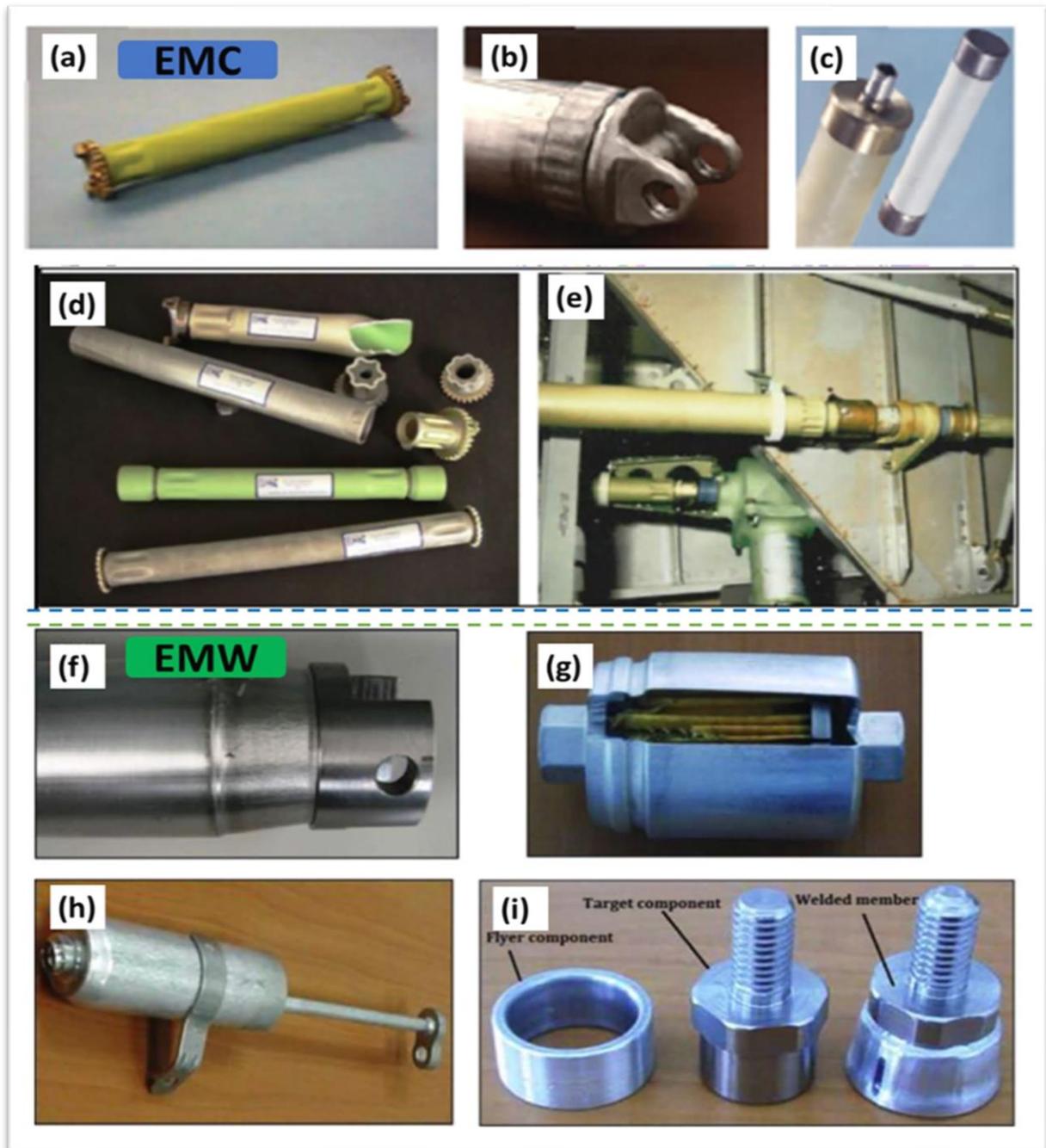
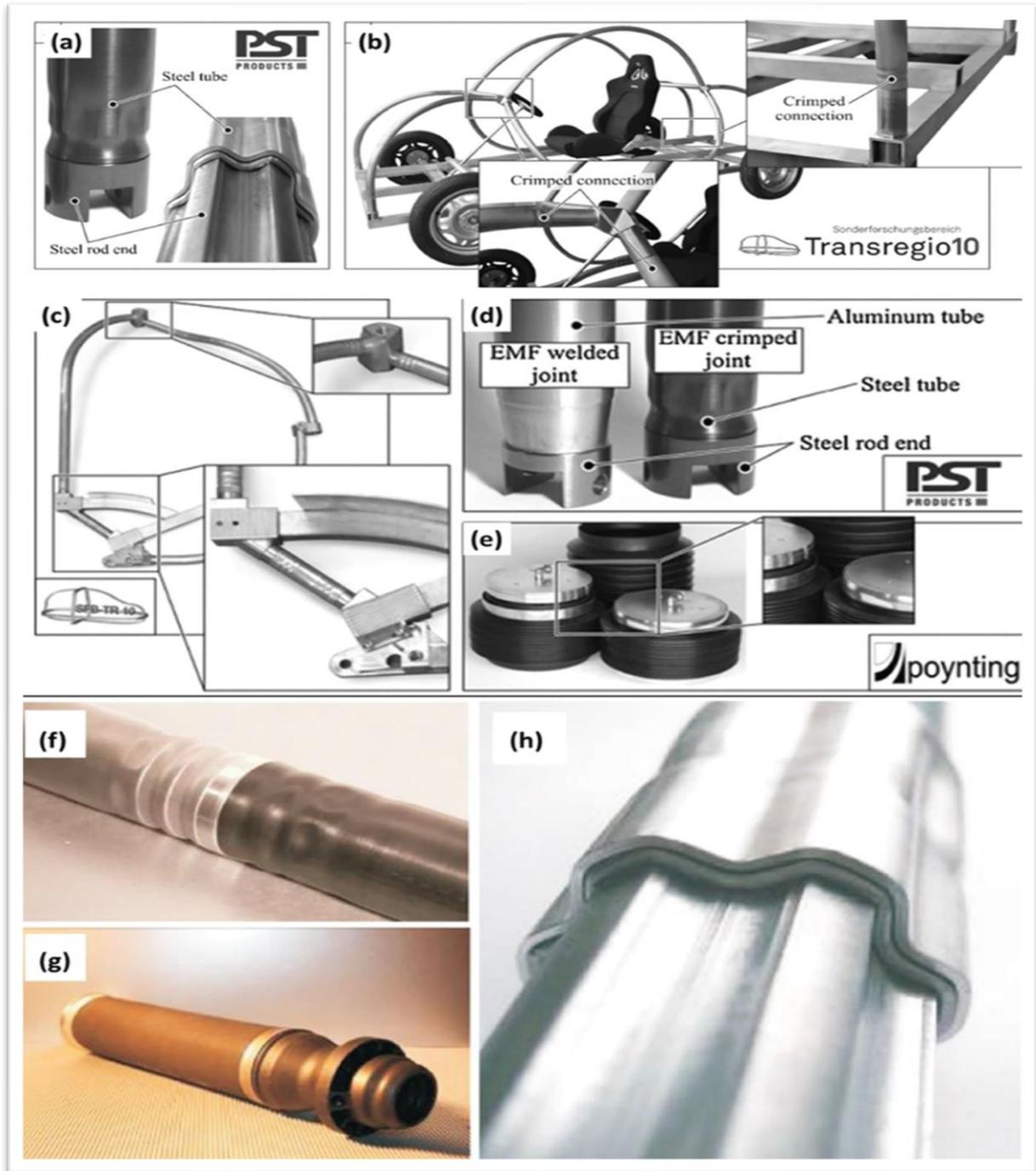


Figure I.17 : Échantillons, (a) Tube de couple Boeing 777, (b) Axe d'entraînement de 4'' pour Ford, (c) Fuseau de haute tension [50], (d) Tubes de couple de vol d'aéronef [50], (e) Tubes d'exploitation d'avion de contrôle de vol [39], (f) Joint entre un axe de traction d'aluminium et un composant en acier; (g) Connexion entre deux éléments d'aluminium dans un filtre à essence; (h) Récepteur de climatisation du véhicule; et (i) Connecteur d'atterrissage électrique automobile [35]



**Figure I.18 : (a) Châssis d'entraînement, (b) Cadres d'espace produits par EMJ, (c) Structure de cadres légers, (d) Châssis avec joints soudés et crochés, (e) Récipient d'expansion d'huile avec un anneau d'aluminium comprimé [51], (f) Tube aluminium/acier, (g) Tubes d'accrochage pour la suspension d'air, et (h) Assemblage d'axes d'entraînement [52].**

### I.9. Avantages du sertissage électromagnétique

➤ **Santé et ergonomie** : L'utilisation du sertissage électromagnétique permet de diminuer la fatigue physique des opérateurs, car il requiert une force manuelle bien inférieure à celle des outils à commande manuelle.

➤ **Vitesse et efficacité** : Le sertissage électromagnétique est pratique et permet de traiter des sections de conduites d'un diamètre compris entre 0,14 et 28mm. Il permet d'économiser considérablement le temps par rapport aux méthodes de sertissage mécanique.

➤ **Qualité et précision** : Les machines de sertissage électromécaniques offrent des résultats de sertissage optimaux tout en préservant une qualité élevée (Les connecteurs de câbles, les manchons pour torons ou les cosses tubulaires peuvent être adaptés).

➤ **Flexibilité et adaptabilité** : Les outils de sertissage électromécaniques offrent une grande polyvalence et conviennent à divers types de connecteurs et de cosses. Les raccords union, coudes, tés, à écrou et filetés de diamètre 12, 16 et 22 mm peuvent également être utilisés avec ces outils.

➤ **Sécurité et hygiène** : Le sertissage électromagnétique est un processus de fusion à froid, sans utilisation de flammes, ce qui exclut tout risque d'incendie. Il est aussi propre, car il ne requiert pas de temps de refroidissement, de purge des conduites, d'inhalation de fumées ou de pollution.

➤ **Répétabilité et précision** : La répétabilité du sertissage électromagnétique est remarquable, ce qui revêt une grande importance pour les opérations de sertissage dans l'industrie et le secteur de l'électricité.

➤ **Sécurité** : Le sertissage électromagnétique est une méthode d'assemblage à froid, sans utilisation de flammes, ce qui exclut tout risque de feu.

➤ **Hygiène** : Le sertissage électromagnétique est ami de l'environnement, car il ne requiert pas de temps de refroidissement, de purge des conduites, d'inhalation de fumées ou de pollution.

➤ **Qualité et précision** : Les machines de sertissage électromécaniques offrent des résultats de sertissage optimaux tout en préservant une qualité élevée.

➤ **Les outils** de sertissage électromécaniques offrent une grande polyvalence et une grande adaptabilité, ce qui leur permet de traiter divers types de connecteurs et de cosses.

En résumé, l'utilisation du sertissage électromagnétique présente de multiples avantages en matière d'ergonomie, de santé, de rapidité, de qualité et de sécurité. Cette méthode de sertissage

moderne et performante est de plus en plus répandue dans les secteurs de l'électricité et de l'électronique.

#### I.10. Inconvénients du sertissage électromagnétique

➤ **Prix des raccords** : En général, les raccords de sertissage sont plus onéreux que les raccords en soudure.

➤ **Formation requise** : Le sertissage électromagnétique est une méthode moins courante et nécessite une formation particulière.

➤ **Sélectivité des matériaux** : Le sertissage électromagnétique convient aux matériaux qui présentent une bonne conductivité électrique et qui se chevauchent.

➤ **Conséquences sur la santé** : La manipulation électromagnétique peut provoquer des symptômes banals tels qu'un engourdissement dans le pouce, l'index et le majeur, suivi de douleurs et de problèmes.

➤ **L'utilisation d'une source d'énergie** : Les outils de sertissage électromagnétiques requièrent une alimentation électrique pour leur fonctionnement.

➤ **Diamètre limité** : Le sertissage électromagnétique convient aux sections de conduites mesurant entre 0,14 et 28 mm de diamètre.

➤ **Risque de déformation** : Le sertissage électromagnétique peut entraîner une déformation permanente sans retour à l'état initial de la pièce.

➤ **Limitation de vitesse** : Le sertissage électromagnétique est rapide, mais ne peut pas se faire à une vitesse extrêmement élevée.

➤ **Limitation de forme** : Le sertissage électromagnétique est adapté aux pièces cylindriques, elliptiques et rectangulaires.

➤ **Limitation de ductilité** : Le sertissage électromagnétique est adapté aux matériaux à faible ductilité.

# Chapitre II

## Chapitre II Modélisation de l'assemblage par sertissage électromagnétique

### II.1.Introduction

Comme il a été déjà mentionné, le sertissage électromagnétique est un processus complexe provoquant la déformation plastique d'une pièce, résultant d'interactions entre champs électromagnétiques. La simulation numérique offre une compréhension meilleure des phénomènes physiques et du comportement lors de ce processus. Par conséquent, elle permet l'optimisation et la prédiction des paramètres nécessaires pour le sertissage de pièces et donc l'amélioration de l'efficacité du processus.

Notre objectif est de développer un modèle numérique précis qui peut simuler ce processus de EMC de tubes ou de plaques. Nous avons choisi de développer un modèle élément finis couplant les problèmes électromagnétique, mécanique et thermique, mis en jeu lors de ce processus. Notre modèle numérique a été développé sous l'environnement du logiciel Comsol multiphysics.

### II.2 Phénomènes électromagnétiques

#### II.2.1 Equations de Maxwell

En 1864 [45], J.C Maxwell a développé ces équations dans le domaine des machines électriques, en les intégrant de manière très simplifiée sous forme différentielle.

##### a) Maxwell-Faraday

La relation entre la circulation du champ électrique sur un contour fermé et la variation temporelle du flux magnétique à travers une surface qui repose sur ce contour est donnée par l'équation de Maxwell-Faraday (II.1).

Le processus d'induction consiste à générer un champ électrique en raison de la variation temporelle du champ magnétique.

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

##### b) Maxwell-Ampère

La seconde équation, connue sous le nom de Maxwell-Ampère, représente la corrélation entre la circulation du champ magnétique sur un contour fermé et le flux de courant à travers une surface qui repose sur ce contour.

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

**c) Maxwell-Thomson**

Le flux du champ magnétique à travers une surface fermée est inexistant. Les monopôles magnétiques ne sont pas présents, et les lignes de champ magnétique n'ont ni départ ni fin.

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

**d) Maxwell-Gauss**

L'équation de Maxwell-Gauss, montre que le flux électrique à travers une surface fermée est associé à la charge électrique présente à l'intérieur de celle-ci. En d'autres termes, les charges électriques génèrent le champ électrique.

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

**e) Equation de continuité**

Seules trois équations sont indépendantes parmi les cinq équations précédentes. Les deux premières équations combinées peuvent donner un système indépendant, que ce soit avec la forme électrique de la loi de Gauss ou avec l'équation de continuité [12].

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} (\vec{j}) = -\frac{\partial \vec{p}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- $\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].
- $\vec{B}$  : Induction magnétique [T].
- $\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].
- $\vec{D}$  : Induction électrique [A.S/m<sup>2</sup>].
- $\vec{j}$  : Densité de courant [A/m<sup>2</sup>].
- $\rho$  : Densité de charge [C/m<sup>2</sup>].

**II.2.2. Lois de comportement des milieux**

Les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu sont définis de manière exhaustive en ajoutant aux équations précédentes les lois constitutives des matériaux ou les lois de comportement des milieux. Elles établissent une connexion entre les divers champs magnétiques et électriques [53,54] Pour des matériaux linéaires et isotropes, elles s'écrivent sous les formes suivantes :

**a) Caractéristique magnétique**

C'est la relation liant le champ et l'induction magnétiques.

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

Dans le cas des matériaux magnétiques, le modèle est de forme linéaire :

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

Lorsqu'il s'agit de matériaux durs (aimant permanent), on introduit le phénomène de rémanence, et on obtient une loi de la forme suivante :

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

**b) Caractéristique diélectrique**

La relation diélectrique pour le comportement électrique se présente de la manière suivante :

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

**c) Loi d'Ohm**

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- $\mu$  : Perméabilité du matériau [H/m].
- $\mu_r$  : Perméabilité relative du milieu
- $\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide [H/m].
- $\mu_a$  : Perméabilité magnétique de l'aimant [H/m].
- $\varepsilon$  : Permittivité de matériau [F/m].
- $\varepsilon_0$  : Permittivité de vide [F/m].
- $\varepsilon_r$  : Permittivité de relative.
- $\sigma$  : Conductivité électrique [S/m].
- $\vec{B}_r$  : Induction rémanente [T].

- $\vec{p}$ : En présence d'un champ électrique, le vecteur de polarisation détermine la polarisation du matériau  $\vec{E}$ .
- $\vec{M}$ : Le vecteur de magnétisation est utilisé pour décrire la magnétisation du matériau lorsqu'il est soumis à un champ magnétique.

La plupart des phénomènes électromagnétiques sont décrits par les équations précédentes, mais il est difficile de les résoudre directement. Certains phénomènes deviennent négligeables, ce qui entraîne le découplage des équations en modèles plus simples.

Donc, la densité de courant est exprimée de la manière suivante :

$$\vec{J} = \vec{j}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.11})$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- $\vec{j}_s$ : Densité de courant imposée dans l'inducteur.
- $\vec{J}_{ind}$ : Densité de courant induit.
- $\sigma\vec{E}$ : Le courant de conduction résultant de champ électrique  $\vec{E}$ .
- $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ : Le courant résultant du mouvement à la vitesse  $\vec{V}$ .

### II.2.3. Propriétés des matériaux

Les relations constitutives (II.8) (II.9) (II.10) ont été formellement introduites. Dans certains cas de matériaux, ces relations qui semblent simples peuvent être plus complexes.

Le problème le plus complexe réside dans le cas de matériaux inhomogènes où les paramètres constitutifs présentent des variations en fonction des coordonnées spatiales.

Les relations en champs des matériaux anisotropes varient en tout point pour différentes directions. Cela signifie qu'il est essentiel d'utiliser un tenseur  $3 \times 3$  afin de définir de manière précise les relations constitutives. Lorsque ce tenseur est symétrique, on parle souvent de matériau réciproque et on peut faire tourner le système de coordonnées pour obtenir une matrice diagonale [55].

L'effet de variation des propriétés (perméabilité magnétique et permittivité électrique) en fonction de l'intensité du champ électromagnétique est appelé non linéarité. Cela englobe

également l'effet d'hystérésis, où les intensités de champ ont un impact non seulement sur les caractéristiques physiques du matériau, mais également sur l'historique de la répartition du champ.

Enfin, la dispersion fait référence aux variations de vitesse d'onde en fonction de la longueur d'onde. En ce qui concerne le domaine fréquentiel, la dispersion se manifeste par une dépendance aux lois qui composent la fréquence [12].

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

Les champs électromagnétiques sont discontinus lors du passage d'un milieu à un autre et ne peuvent donc pas être différenciés. Toutefois, on peut tirer des données des conditions de transmission des champs [56] :

➤ Lorsqu'une surface traverse deux milieux 1 et 2 distincts et reçoivent des charges réelles avec des densités superficielles  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ , les relations locales se manifestent de la manière suivante :

$$\vec{E}_{t_2} - \vec{E}_{t_1} = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\varepsilon_2 \vec{E}_{n_2} - \varepsilon_1 \vec{E}_{n_1} = \sigma \quad (\text{II.14})$$

Avec :

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

➤ Lorsque la surface traverse deux milieux 1 et 2 distincts et traversée par des courants réels de densité superficielle  $\vec{J}_s$ , les relations locales se transforment en :

$$\vec{B}_{n_2} = \vec{B}_{n_1} \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{1}{\mu_2} \vec{B}_{t_2} - \frac{1}{\mu_1} \vec{B}_{t_1} = \vec{J}_s \wedge \vec{n} \quad (\text{II.16})$$

Où :

$\vec{B}_t$  et  $\vec{B}_n$  : Sont les composantes tangentielle et normale du champ magnétique, respectivement.

➤ La condition de continuité de la densité normale du courant de conduction aux interfaces entre deux milieux de conductivités électriques différents est définie comme suit :

$$(\vec{J}_1 - \vec{J}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Avec :

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

## II.2.5. Equation électromagnétique

Le modèle magnétodynamique, qui s'applique aux dispositifs électrotechniques avec sources de courant ou de tension, régit les phénomènes électromagnétiques impliqués dans le processus de sertissage électromagnétique. La présence des courants induits combine alors les champs électrique et magnétique [54].

Le système d'équations électromagnétiques à utiliser, en utilisant la formulation en potentiels et en prenant en compte les matériaux isotropes, 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

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

## II.2.6. Calculs des grandeurs électromagnétiques

### II.2.6.1. Courant de décharge

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

$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi \omega_0 t) \sin(2\pi f t) \quad (\text{II.20})$$

$$\xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \text{Et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

- $\xi$  : Coefficient d'amortissement
- $\omega_0$  : Pulsation propre [rad/s]
- $V_0$  : Tension du générateur [V]
- $C$  : Capacité électrique du circuit de décharge [F].
- $L$  : inductance du circuit de décharge [H]

### II.2.6.2. Calcul des courants induits

Il est essentiel d'introduire les deux termes, le courant de conduction et celui causé par le mouvement, afin de calculer les courants induits, l'équation (II.12) s'écrit :

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

### II.2.6.3. Force électromagnétique

La répartition des forces électromagnétiques dans un système est influencée par le matériau utilisé. Par conséquent, les formules et les méthodes employées pour évaluer les forces électromagnétiques varient en fonction des divers types de matériaux [57].

Le calcul des forces dans un dispositif à courant induit est le plus souvent effectué en utilisant l'expression de Lorentz fournie par l'équation suivante :

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

Avec :

- $\vec{F}$  : Force électromagnétique [N/m<sup>3</sup>].
- $\vec{J}$  : Densité de courant induite [A/m<sup>2</sup>].
- $\vec{B}$  : Densité de flux magnétique [T]

### II.2.7. Conditions aux limites

Dans l'équation électromagnétique, les conditions aux limites prises en compte sont les suivantes :

- L'axe de symétrie présente un potentiel magnétique nul (r=0).
- Une isolation magnétique est considérée au niveau de la boîte d'air (A=0).

### II.3. Phénomène mécanique

Pour créer un modèle numérique de l'étude des systèmes de sertissage électromagnétique, il faut combiner les équations électromagnétiques et les équations mécaniques afin d'analyser le comportement temporel et spatial des différents éléments d'un dispositif de SEM.

La loi qui explique et régie le comportement des matériaux soumis à des contraintes a été formulée par le physicien anglais Robert Hooke en 1676. L'état solide d'un matériau ne peut résister à une force appliquée qu'en se déformant sous l'effet de la force [58].

#### II.3.1 Equation d'équilibre

La déformation de tous matériaux isotropes est régie par l'équation d'équilibre, également connue sous le nom de seconde loi de Newton en 3D :

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{\gamma} \quad (\text{II.24})$$

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

Avec :

- $\rho$  : La masse volumique des matériaux [Kg/m<sup>3</sup>].
- $\vec{u}$  : Champ de déplacement (u, v, w) [m].
- $\sigma$  : Tenseur de contraintes [Pa].
- $\vec{F}$  : Vecteur de charge [N/m<sup>3</sup>].

#### II.3.2 Lois de Hooke

D'après la loi de Hooke, le coefficient de contrainte  $\sigma$  est inversement proportionnel au coefficient de déformation  $\varepsilon$ , avec un facteur C appelé module d'élasticité [54] :

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (\text{II.26})$$

Avec :

- $\varepsilon$  : Tenseur de la déformation.
- C : module d'élasticité.

### II.3.3 Relation déformation-déplacement

Il est possible de décrire entièrement les conditions de déformation en un point en utilisant les composantes de la déformation ( $u, v, w$ ) et leurs dérivées. On peut décomposer la déformation  $\varepsilon$  de la manière suivante [12] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (\text{II.27})$$

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (\text{II.28})$$

Avec :

- $\varepsilon_{el}$  : La déformation élastique.
- $\varepsilon_{th}$  : La déformation thermique.
- $\varepsilon_p$  : La déformation plastique.
- $\alpha$  : Le coefficient d'expansion thermique.
- $T$  : Température [K].
- $T_{ref}$  : Température ambiante [K].

Dans le cadre de la modélisation des systèmes de sertissage électromagnétique, la déformation thermique est négligée, car les fluctuations de température pendant le processus de SEM ne sont pas très importantes.

Les composantes de la déformation sont :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

Et

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{yz} \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xz} \quad (\text{II.29})$$

### II.3.4 Relation contrainte-déformation

Le tenseur symétrique est utilisé pour décrire la contrainte dans un matériau

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

Avec :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (\text{II.31})$$

Il existe deux cas différents pour le comportement mécanique des matériaux non linéaires. [37-38] :

- Cas élasto-plastique
- Cas isotrope

### a) Cas élasto-plastique

Les contraintes et la déformation sont liées par :

$$\sigma = D\varepsilon_{el} + \sigma_0 = D(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{II.32})$$

Avec :

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

Et :

- E : Le module de Young.
- $\nu$  : Le coefficient de poisson.
- $\varepsilon_0$  : Contrainte initiale.

### b) Cas isotrope

Dans ce cas la matrice D est différente :

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Et :

$$\sigma = Dd \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{xy0} \\ \varepsilon_{yz0} \\ \varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$Dd = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

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 :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.37})$$

Nous n'avons utilisé que le cas élasto-plastique dans notre travail.

La relation constitutive intégrée dans COMSOL explique le comportement structural du matériau, c'est-à-dire le modèle constitutif de Johnson Cook.

### II.3.5 Symétrie axiale

Pour la symétrie axiale, on utilise les coordonnées cylindriques  $r$ ,  $\theta$  et  $z$ . Dans cette situation, on suppose que le mouvement dans la direction  $\theta$ , les éléments de la contrainte  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$  et les éléments de la déformation  $\gamma_{r\theta}$ ,  $\gamma_{\theta z}$  sont nuls. Les charges ne sont pas liées à  $\theta$  et ne sont prises en compte que les charges dans les directions  $r$  et  $z$ .

Pour éliminer les problèmes de division par  $r$  en  $r = 0$ , les équations sont modifiées. On multiplie la première par  $r^2$  et la deuxième par  $r$ , et on introduit une nouvelle variable  $u' = \frac{u}{r}$  [56].

La relation déformation-déplacement en symétrie axiale est la suivante :

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (\text{II.38})$$

Dans notre travail, les modèles numériques sont bidimensionnels, puisque les problèmes étudiés sont axisymétriques.

### II.3.6 Conditions aux limites

Aux extrémités du domaine global, nous prenons en compte certaines conditions aux limites courantes [35-40].

- Condition de symétrie axiale le long de l'axe (z) :  $\mathbf{r} = \mathbf{0}$
- Les autres extrémités sont libres de se déformer, en d'autres termes, le mouvement de ces extrémités est libre.

## II.4. Phénomènes thermiques

### II.4.1 Equation thermique

Afin d'analyser la répartition de la température dans les pièces assemblées par impulsion magnétique, l'équation thermique doit être introduite, régissant le phénomène thermique, dû à l'effet joule, créé par la circulation des courants induits [59-60-61].

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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-k \overrightarrow{\text{grad}} T) = Q + q_s T \quad (\text{II.39})$$

Avec :

- T : La température [K]
- K : Conductivité thermique [W/m. K].
- $\rho$  : Densité volumique du matériau [kg/m<sup>3</sup>].
- Cp : Capacité calorifique [J/kg. K].
- Q: source de chaleur, représentée par la chaleur dégagée par effet joule [W].
- $q_s$ : coefficient d'absorption ( $q_s = 0$ ). Le phénomène d'absorption est négligé.

### II.4.2 Conditions aux limites

Les seules conditions aux limites du problème thermique considérées dans la simulation des systèmes de sertissage EM sont :

- Flux convectifs au niveau des frontières des pièces, en contact avec l'air ambiant.

## II.5. Couplage des diverses équations

### II.5.1 Couplage fort

Le couplage fort est celui qui donne les résultats les plus proches de la réalité et demande la résolution du système global d'équations (équations électromagnétiques, mécaniques et thermiques) à chaque étape de calcul [62].

Ce type de couplage présente un inconvénient : il nécessite la manipulation de grandes matrices, ce qui nécessite davantage d'espace mémoire et de temps de calcul. Néanmoins, le développement actuel de l'outil informatique rend l'utilisation de ce type de couplage possible, même pour les problèmes multi physiques.

Afin de prendre en considération la déformation de la géométrie, celle-ci est ajustée à chaque étape du processus et un processus de remaillage est appliqué à chaque étape de calcul.

Il s'agit du type de couplage employé dans cette étude.

### II.5.2 Termes de couplage

On peut représenter les termes du couplage entre les différentes équations par :

- Les forces électromagnétiques (II.23), qui correspondent aux charges exercées sur les pièces en déformation : deuxième terme de l'équation mécanique (II.25).
- Pour l'équation thermique (II.40), la source de chaleur est évaluée par effet de Joule :

$$Q = \frac{1}{2\sigma} J^2 \quad (\text{II.40})$$

## II.6. Logiciel de simulation

Pour simuler le processus de sertissage électromagnétique et les diverses applications de ce mécanisme, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics 3.5. Il s'agit d'un logiciel développé par l'entreprise « Comsol » créée en 1986 [63].

Le logiciel COMSOL présente une pertinence particulière en raison de sa réputation de robustesse pour ses calculs, de son utilisation croissante dans l'industrie et de la littérature qui montre que des équipes de recherche utilisent ce logiciel pour simuler divers processus multiphysiques, impliquant différents phénomènes de nature variée [64]. Il se distingue par la discrétisation éléments finis des équations différentielles et la résolution du système global entièrement couplé.

En revanche, COMSOL ne crée ni fichiers de sortie ni de résolution ; tout se déroule dans un seul fichier. Donc, après une résolution, il ne reste que le fichier «mph », qui a tendance à devenir très volumineux [45].

Toutes les applications simulées sous environnement Comsol et les résultats obtenus numériquement feront l'objet du chapitre suivant.

## II.7. Conclusion

Le présent chapitre vise à élaborer et exposer les modèles mathématiques et numériques liés aux phénomènes physiques, électromagnétiques, mécaniques et thermiques impliqués dans tout processus de sertissage électromagnétique.

De plus, nous avons effectué une brève présentation du logiciel COMSOL utilisé.

Le chapitre suivant abordera différentes applications liées à diverses installations de sertissage électromagnétique (Sertissage de plaques – Sertissage de tubes), en analysant les différentes conditions de travail. Des analyses paramétriques ont été menées, afin de mettre en évidence l'influence de certains paramètres physiques et géométriques sur l'efficacité et les performances de ce processus industriel.

# Chapitre III

## Applications et Résultats

### III.1. Introduction

L'implantation numérique, sous l'environnement COMSOL ainsi que la validation des modèles présentés précédemment est détaillée dans ce chapitre. En effet, nous présentons ici toutes les applications de sertissage électromagnétique (SRTEM), en utilisant le logiciel COMSOL, basé sur la méthode des éléments finis. C'est un outil très développé et bien adapté aux problèmes multi-physiques car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation éléments finis.

L'objectif principal de nos simulations est le calcul des courants induits, les forces de Lorentz, que subissent les pièces déformées par SRTEM, ainsi que les profils des pièces serties et les distributions de la température à la fin de ce processus.

### III.2. Simulation du sertissage électromagnétique

La simulation du processus de SRTEM de pièces, en particulier le sertissage des tubes et celui des plaques, peut se résumer dans les étapes suivantes :

La première étape consiste à définir la géométrie bidimensionnelle des installations de SRTEM.

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

Ensuite, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel nul imposé au niveau de la boîte d'air, considérée de dimensions assez grandes, le déplacement libre des frontières des pièces en déformation et le flux thermique convectif avec l'air, considéré sur ces frontières.

Le maillage automatique de COMSOL fournit un maillage bien adapté aux problèmes simulés et permet à l'utilisateur d'affiner toute région pour gagner dans la précision de la solution numérique. Un remaillage est appliqué à chaque étape de calcul pour considérer le déplacement et la déformation des pièces considérées.

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

Le post processeur permet l'affichage des résultats, en donnant les répartitions spatiales et temporelles de toutes les grandeurs électriques, mécaniques et thermiques de notre simulation.

### III.3. Inducteurs du SRTEM

L'inducteur est l'élément de base, qui contribue fortement, lors du processus de SRTEM. Dans notre travail et dans les différentes simulations, plusieurs inducteurs sont considérés, certains sont massifs et d'autres sont solénoïdes, semblables à ceux utilisés expérimentalement [65-66], dont les spécifications géométriques sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Spécifications des inducteurs utilisés dans les simulations

	<b>Inducteur 1</b>	<b>Inducteur 2</b>	<b>Inducteur 3</b>
<b>Spécifications</b>	<b>Tube massif</b>	<b>Solénoïde à 3 spires</b>	<b>Disque massif</b>
<b>Longueur [mm]</b>	20	20	/
<b>Diamètre intérieur [mm]</b>	16	16	/
<b>Epaisseur [mm]</b>	04	/	01
<b>Diamètre des spires [mm]</b>	/	04	/
<b>Distance entre spires [mm]</b>	/	03	/
<b>Diamètre [mm]</b>	/	/	24

### III.4. Matériaux des pièces pour SRTEM

Lors du processus de SRTEM, plusieurs matériaux sont utilisés, pour les pièces en sertissage. Après notre recherche bibliographique, nous avons décidé d'utiliser, dans notre simulation, les matériaux les plus utilisés, en particulier dans l'industrie d'automobiles.

Pour tous les inducteurs, le matériau considéré est le cuivre.

Les propriétés physiques des matériaux utilisés, dans l'étude paramétrique, sont regroupées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Propriétés physiques des matériaux utilisés

	Aluminium	Acier	Cuivre	Magnésium AZ31B	Argent
<b>Densité [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	2700	7850	8700	1770	10500
<b>Conductivité électrique [S/m]</b>	$3.774 \cdot 10^7$	$4.032 \cdot 10^6$	$5.998 \cdot 10^7$	$1.087 \cdot 10^7$	$61.6 \cdot 10^6$
<b>Module de Young [Pa]</b>	$70 \cdot 10^9$	$200 \cdot 10^9$	$110 \cdot 10^9$	$45 \cdot 10^9$	$38 \cdot 10^9$
<b>Coefficient de poisson</b>	0.33	0.33	0.35	0.35	0.37
<b>Conductivité thermique [W/m. K]</b>	160	44.5	400	96	429
<b>Capacité calorifique [J/kg. K]</b>	900	475	385	1000	235

### III.5. Paramètres du processus

Dans le SRTEM, il existe différents paramètres physiques, affectant la formabilité des pièces utilisées. En se basant sur la littérature, les paramètres major qui affectent le sertissage des pièces sous pression électromagnétique, à savoir, l'énergie du générateur (courant de décharge), les matériaux des pièces et la forme de l'inducteur ainsi que la forme et les dimensions du filetage.

Ceux sont ces paramètres sélectionnés dans nos études paramétriques.

### III.6. Sertissage électromagnétique des pièces tubulaires

#### III.6.1 Installation de sertissage de tubes

Comme première application du SRTEM, nous avons simulé un système proche de l'installation expérimentale [65-66].

Le système simulé comporte, en plus de l'inducteur tubulaire, massif ou spiral, de longueur 20mm et largeur 4mm, un tube extérieur, de longueur 55mm, d'épaisseur 0,9mm et de diamètre intérieur 10,9mm qui est assemblé avec un autre tube interne de longueur 55 mm, d'épaisseur 2mm et de diamètre intérieur 6mm, présentant un filetage de longueur 20mm, avec un « pitch » de 1mm et une distance entre les deux tubes de 0,45mm, il est présenté dans la figure III.1.

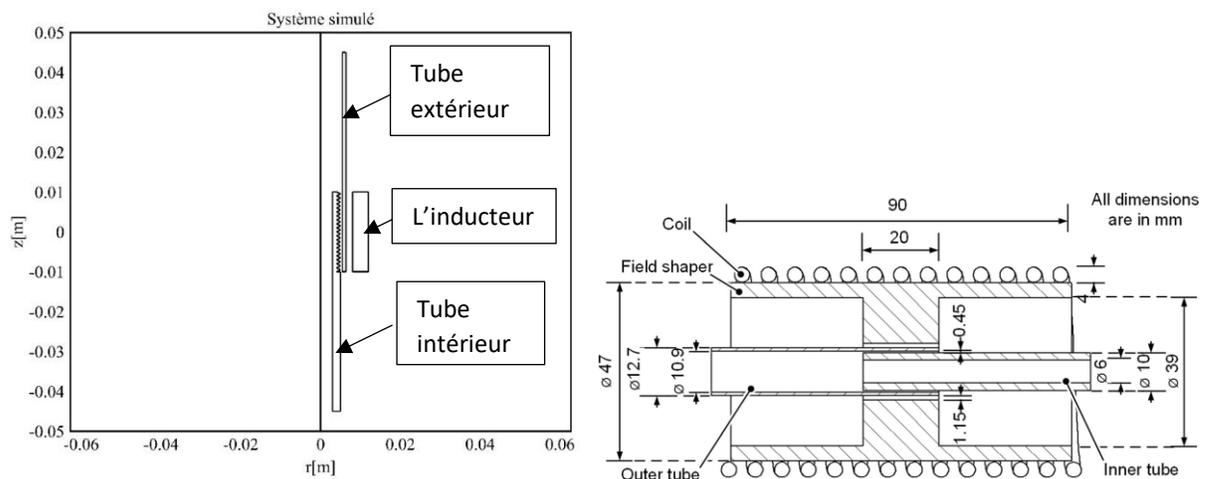


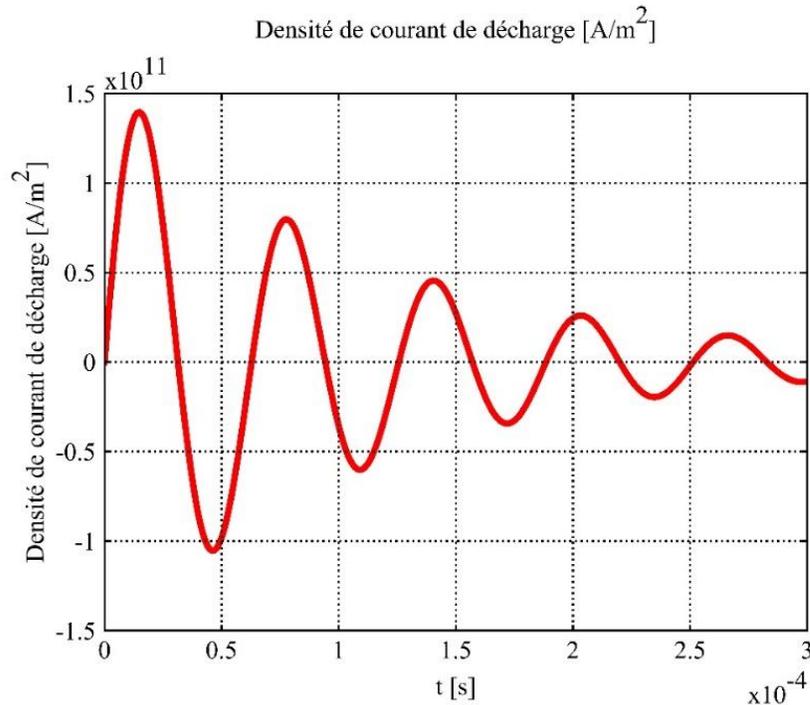
Figure III.1: Système simulé et installation expérimentale [65-66]

#### III.6.2 Courant de décharge

Dans les systèmes de formage et assemblage électromagnétiques, en particulier ceux du SRTEM, le générateur électrique formé par un banc de capacités, délivre un courant de décharge impulsionnel de grandes amplitudes et fréquences, permettant d'effectuer ces processus dans un temps extrêmement faible (quelques microsecondes) avec des déformations de précision plastiques.

Dans nos simulations numériques du sertissage des tubes et en utilisant l'inducteur 1 (Tableau III.1), le courant de décharge (III.1), considéré dans la simulation, est un courant impulsionnel de grande fréquence, montré sur la figure III.2.

$$J_{\varphi} = 1,6 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-8928 \cdot t) \cdot \sin(10^5 \cdot t) \quad (\text{III.1})$$



**Figure III.2 : Courant de décharge**

### III.6.3 Résultats numériques

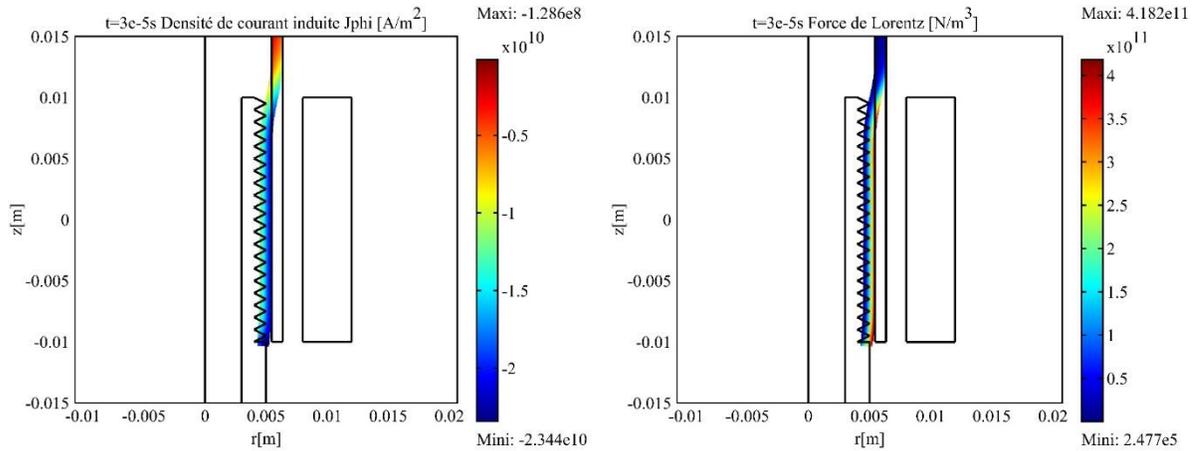
Les courants induits créés au niveau du tube en cuivre par le courant de décharge impulsionnel (figure III.2), obtenus à l'instant final de sertissage  $t=30\mu\text{s}$ , sont représentés sur la figure III.3 (a), ils sont de forme et de valeur théoriquement prévisibles, puisqu'ils sont opposés au courant inducteur et plus importants sur les parties en face de l'inducteur et montrent bien l'effet de bord qui engendre une accentuation des courants induits au niveau de l'extrémité inférieure du tube.

D'autre part, ces courants induits au niveau du tube en cuivre engendrent d'importantes forces de Lorentz (Figure III.3 (b)), et provoquent la compression et le sertissage de ce dernier (figure III.4 (a)).

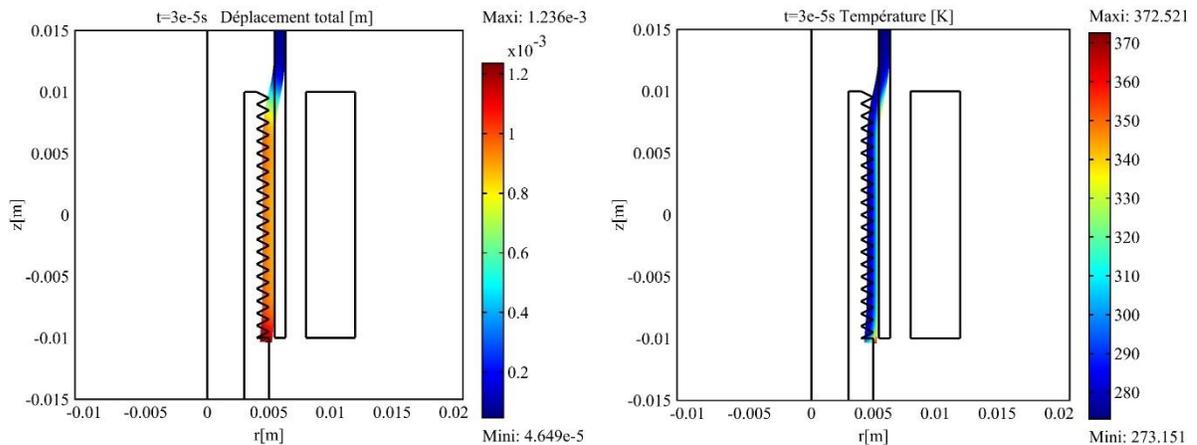
En effet, ces forces électromagnétiques intenses sont surtout concentrées dans la partie du tube, en face de l'inducteur, où règnent le champ magnétique et les courants induits, ce qui explique la forme du sertissage des deux tubes, obtenue à l'instant  $t=30\mu\text{s}$ . Ainsi la forme obtenue pour le

sertissage acier-cuivre par pression électromagnétique est bien prévisible théoriquement (Figure III.4 (a)).

De plus, la distribution finale de la température à  $t=30\mu\text{s}$  (Figure III.4 (b)), montre que cette dernière est bien prévisible puisque toute augmentation de la température est due à l'effet joule engendré par le courant induit au niveau du tube.



**Figure III.3 : (a) Densité de courant induite à  $t=30\mu\text{s}$ , (b) Forces magnétiques à  $t=30\mu\text{s}$**

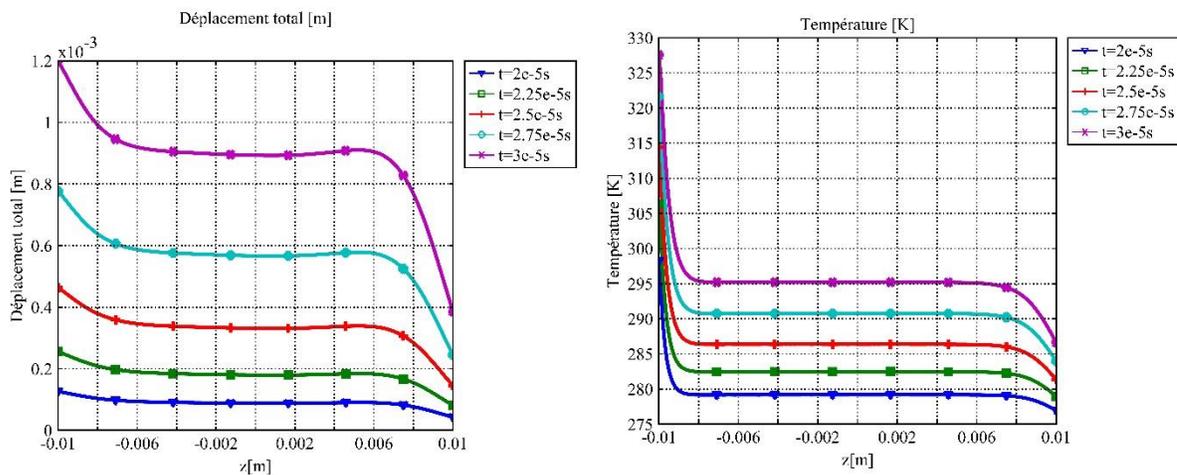


**Figure III.4 : (a) Déplacement total à  $t=30\mu\text{s}$ , (b) Distribution de la température à  $t=30\mu\text{s}$**

D'autre part, il est intéressant d'analyser l'évolution temporelle de la déformation plastique du tube en cuivre pendant le processus de sertissage.

La figure (figure III.5 (a)) présente le déplacement calculé le long de la longueur du tube au niveau de son milieu, à différents instants, et permet de mettre en évidence l'effet de bord qui s'accroît au fur et à mesure dans le temps au niveau du bord inférieur.

Concernant l'évolution dans le temps de la distribution de la température le long du tube (figure III.5 (b)), cette dernière est tout à fait logique : la température est quasi uniforme sur la longueur du tube avec une augmentation durant le processus de sertissage et une accentuation au niveau de l'extrémité inférieure du tube, ce qui est bien expliqué théoriquement, puisque toute élévation de la température est due à l'effet joule, engendré par les courants induits.



**Figure III.5 : (a) Déplacement le long du tube serti à différents instants du sertissage, (b) Distribution de la température à différents instants du sertissage**

Dans la zone de sertissage, trois points sont choisis à intervalles égaux sur la longueur du tube extérieur en cuivre, comme illustré sur la figure III.6.

Les figures (III. 7 (a) et (b)) présentent la variation de la déformation et de la température dans ces nœuds. Il est bien clair que le déplacement des trois points du tube serti est tout à fait logique, le déplacement maximal est remarqué au point inférieur où les courants induits et les forces électromagnétiques sont accentués, à cause de l'effet de bord. De plus, l'extrémité inférieure du tube serti est la plus chaude sous l'effet joule accentué par les courants induits importants.

Ces résultats numériques sont théoriquement prévisibles et se rapprochent des résultats expérimentaux [65] [66]. Néanmoins, les différences remarquées sont dues au courant de décharge considéré dans la simulation, puisque le générateur utilisé dans ces travaux antérieurs n'est pas connu [65] [66].

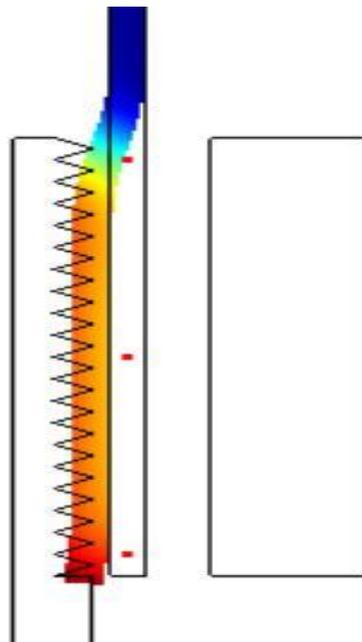


Figure III.6 : Points sélectionnés du tube extérieur serti

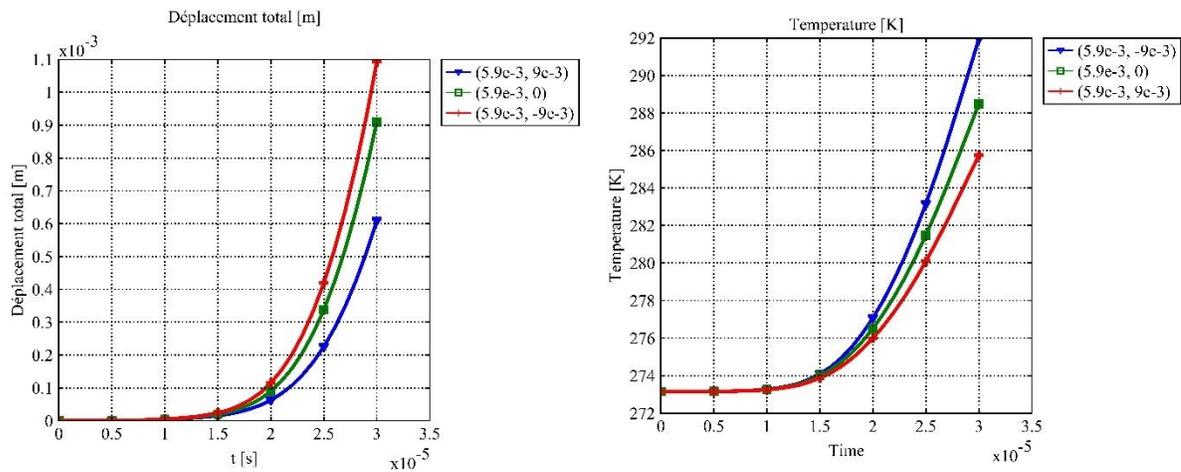


Figure III.7: (a) Variation de la déformation aux trois nœuds sélectionnés, (b) Variation de la température aux trois nœuds sélectionnés

### III.6.4 Etudes paramétriques

En utilisant le système précédent de sertissage de tubes, une étude paramétrique a été menée pour analyser l'effet de certains paramètres physiques et géométriques du processus sur la formabilité du tube et le processus de sertissage de tubes. Nous avons choisi comme paramètres géométriques, en plus de la nature des matériaux des tubes sertis, la forme, la longueur et la largeur

du pitch du filetage, ainsi que le courant de décharge, représentant l'énergie du générateur et la forme de l'inducteur de SRTEM.

#### III.6.4.1 Effet de la nature des matériaux des tubes

Une étude comparative sur la nature des matériaux des tubes lors du SRTEM a été menée, en utilisant le système précédent (figure III. 1), afin d'analyser les différences de comportement entre les différents matériaux ayant différentes caractéristiques (Tableau III.2). Pour cela, nous avons considéré plusieurs combinaisons de matériaux similaires et dissimilaires.

##### a) Sertissage de matériaux similaires

Dans la première étape, nous avons considéré trois combinaisons de matériaux similaires : (Cu-Cu), (Mg-Mg) et (Al-Al), et dans le but de comparer le sertissage de ces différentes combinaisons, nous avons utilisé une énergie plus faible représentée par un courant inducteur plus faible que précédemment :

$$J_{max} = 0,875 \cdot J_{\phi_{max}} = 1,4 \cdot 10^{11} \quad \text{(III.2)}$$

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

A partir des résultats numériques, nous pouvons, clairement, remarquer que l'Aluminium est le matériau qui présente la meilleure formabilité et donc le meilleur sertissage sous pression électromagnétique (figures III. 8(a)-(b)), grâce à ses propriétés électromagnétiques et mécaniques, en particulier, la conductivité électrique, le module de Young et le coefficient de poisson.

Ce résultat est confirmé par le fait que ce matériau est très utilisé par cette technique, en particulier dans l'industrie d'automobile [66].

Cependant, nous pouvons constater (figures III. 8 (a)-(b)) que le cuivre présente la plus faible formabilité à cause de ses propriétés mécaniques, ce qui est théoriquement prévisible.

Concernant le magnésium, grâce à sa faible densité, sa facilité de manipulation et surtout sa légèreté, ce dernier est de plus en plus adopté par l'industrie de véhicules, utilisant le processus de formage électromagnétique. Néanmoins, nous pouvons remarquer qu'il nécessite plus d'énergie dans le processus de SRTEM (figures III. 8 (a)-(b)).

D'autre part, pour ce qui est de la température des tubes sertis des différentes combinaisons de matériaux similaires, les résultats numériques (figures III 9 (a) (b)) montrent que le Magnésium est le matériau le plus chaud lors du processus de SRTEM et cela ne peut être expliqué que par ses propriétés thermiques notamment sa conductivité thermique et sa capacité calorifique (Tableau III.2).

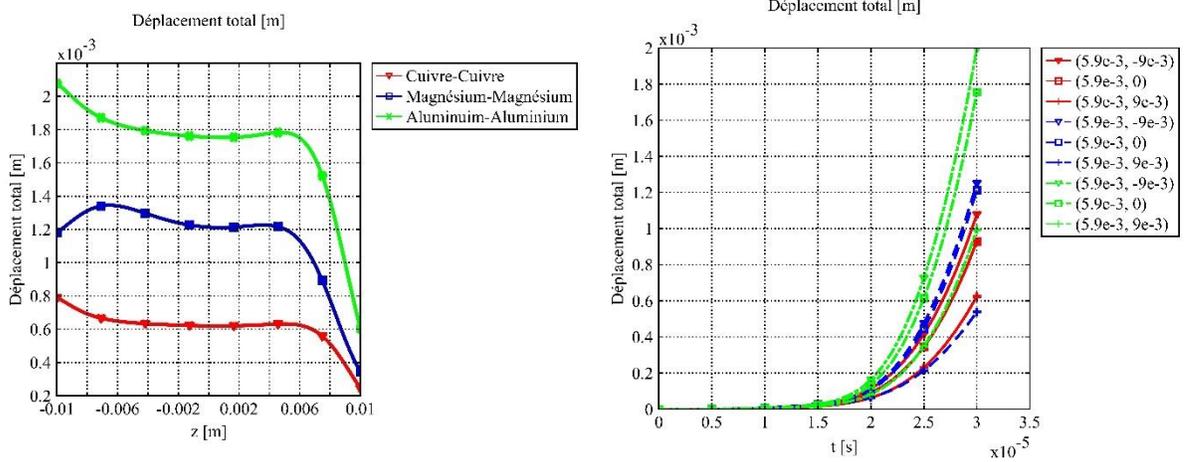


Figure III.8 : (a) Déformation le long du tube serti pour différentes combinaisons similaires, (b) Variation dans le temps du déplacement aux points considérés

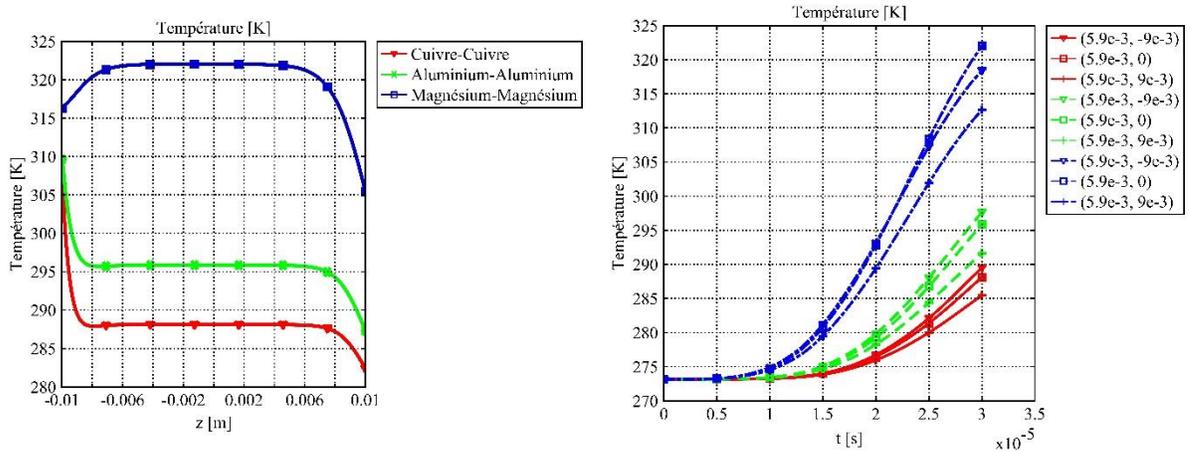
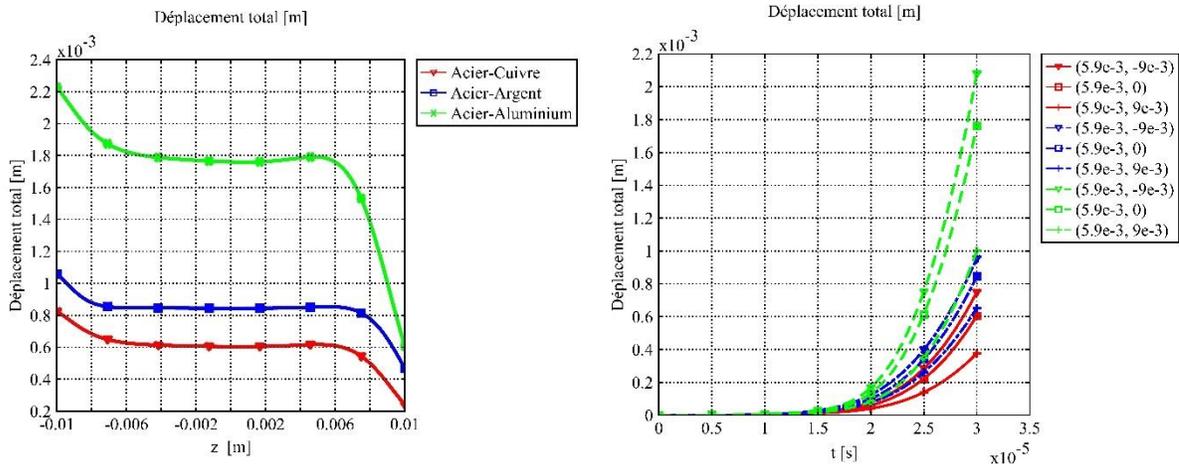


Figure III.9 : (a) Température le long du tube serti pour différentes combinaisons similaires, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés

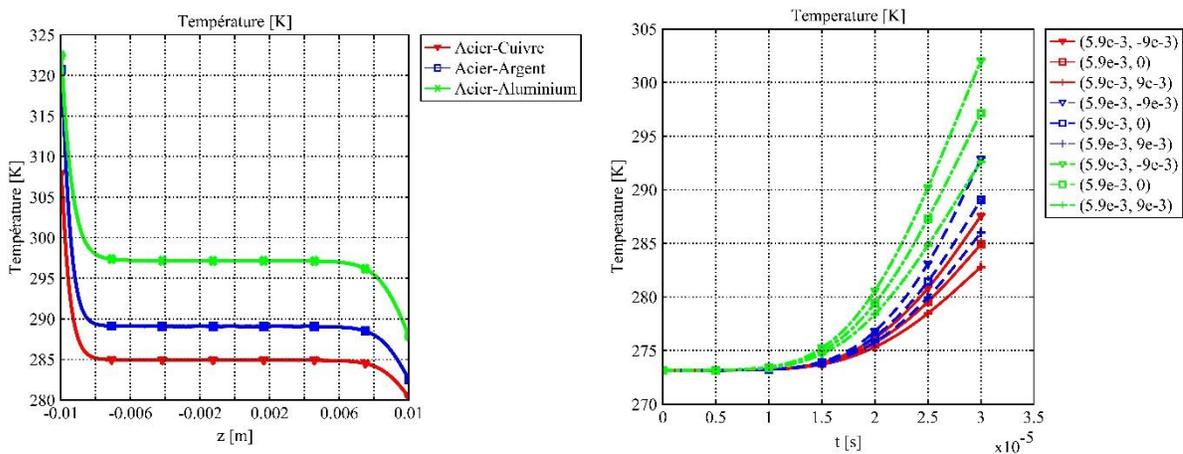
**b) Sertissage de matériaux dissimilaires**

D'autres combinaisons dissimilaires (Ac-Cu), (Ac-Ag) et (Ac-Al) ont été utilisées dans la simulation numérique de l'installation de sertissage étudiée (figure III-1), en utilisant la même énergie du générateur représentée par le même courant inducteur que le sertissage similaire (III2).

D'après les résultats obtenus par nos modèles numériques, la combinaison dissimilaire (Ac-Al) est la plus prometteuse pour le SRTEM, puisqu'elle présente la plus importante déformation (figure III. 10 (a)(b)). De plus, cette combinaison (Ac-Al) montre la plus grande élévation de température lors du processus de SRTEM (figure III.11 (a)(b)). Ces résultats sont théoriquement expliqués en se basant sur les propriétés mécaniques et thermiques de l'aluminium.



**Figure III.10 : (a) Déformation le long de la longueur du tube serti à différents instants, (b) Variation dans le temps du déplacement des points considérés**



**Figure III.11 : (a) Température le long de la longueur du tube serti à différents instants, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés**

### III.6.4.2 Effet de la forme du filetage

Un autre paramètre géométrique à étudier est la forme du filetage du tube intérieur, en plus du filetage triangulaire (sharp v) précédent, nous avons considéré deux autres formes du filetage : le filetage rond (round) et un autre de forme contrefort (Buttress) (figure III. 12), en utilisant comme combinaison (Ac, Cu).

En analysant la déformation du tube extérieur lors du SRTEM, pour les trois types de filetages étudiés, nous pouvons conclure que le filetage rond est celui qui permet d'obtenir le meilleur sertissage, alors que les deux autres : en forme triangulaire et contrefort (Buttress) donnent des résultats très proches (figure III. 13 (a)).

Cependant, la température du tube extérieur sertie n'est pas affectée par la forme du filetage du tube intérieur, ce qui est tout à fait logique (figure III. 13 (b)).

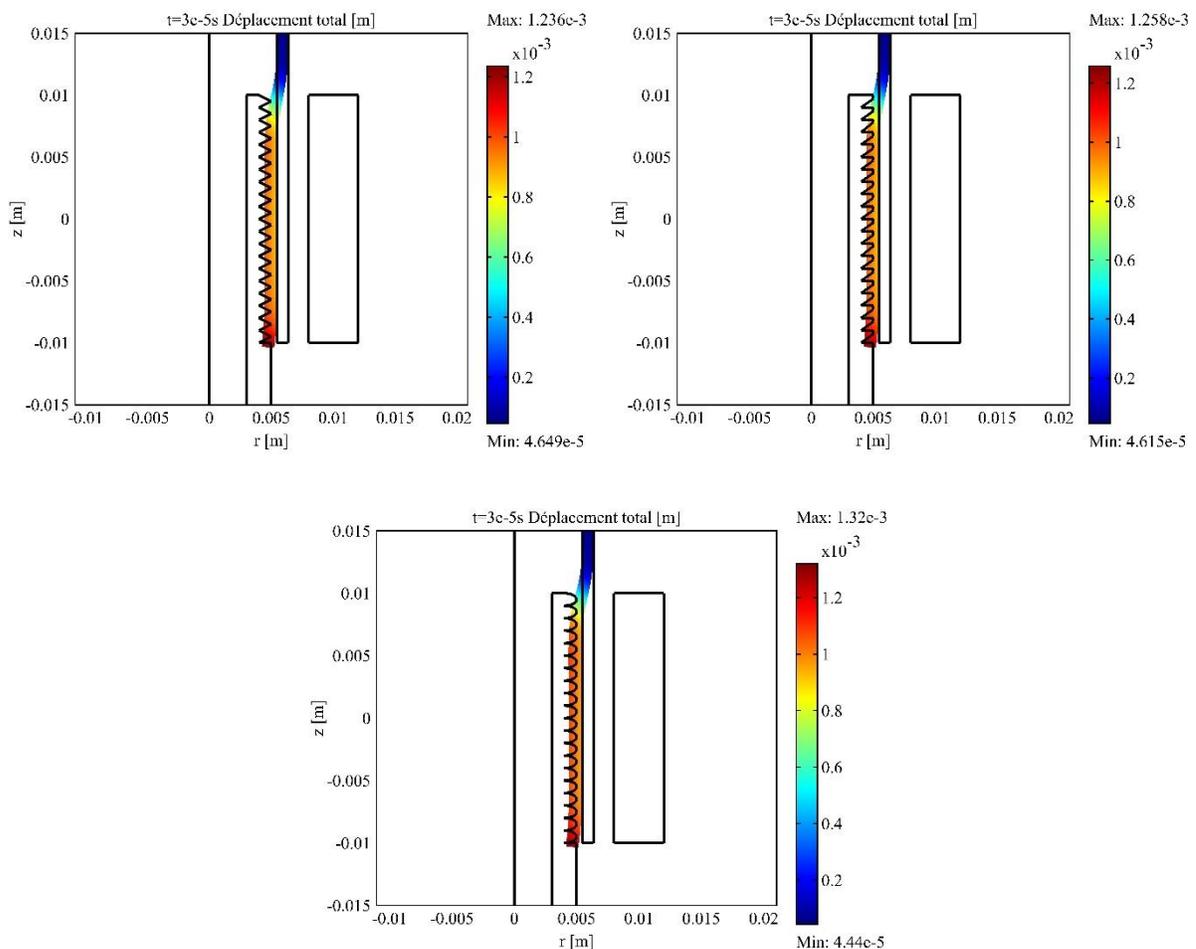
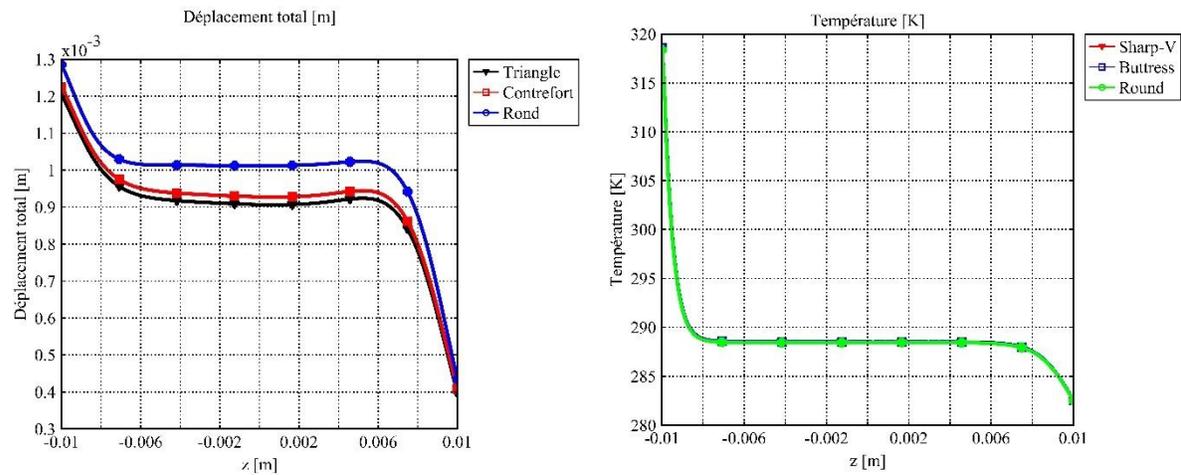


Figure III.12 : Formes des trois filetages considérés (triangulaire, contrefort et rond)



**Figure III.13 : (a) Déformation le long du tube serti pour les différents filetages, (b) Température le long de la longueur du tube serti pour les différents filetages**

### III.6.4.3 Effet de la longueur du filetage

Toujours en considérant un filetage triangulaire avec un pitch de largeur 1mm, nous avons étudié l'effet de sa longueur sur la déformation et la formabilité lors du sertissage électromagnétique.

En effet, nous avons considéré trois différents tubes intérieurs, avec des filetages de différentes longueurs : 20mm, 30mm et 40mm (figure III.14).

Les résultats numériques représentés sur les (figures III. 14 -15), mettent en évidence l'effet de la longueur du filetage (tube intérieur) sur la formabilité et la déformation du tube extérieur serti.

En effet, ce paramètre favorise le sertissage des tubes, plus la longueur du filetage est augmentée plus le sertissage est amélioré (figure III.15 (a)-(b)).

Cependant, la température du tube serti n'est pas affectée par ce paramètre sauf au niveau du bord inférieur (figures III. 16 (a)-(b)), ce qui est prévisible, puisque l'effet Joule est accentué à ce niveau.

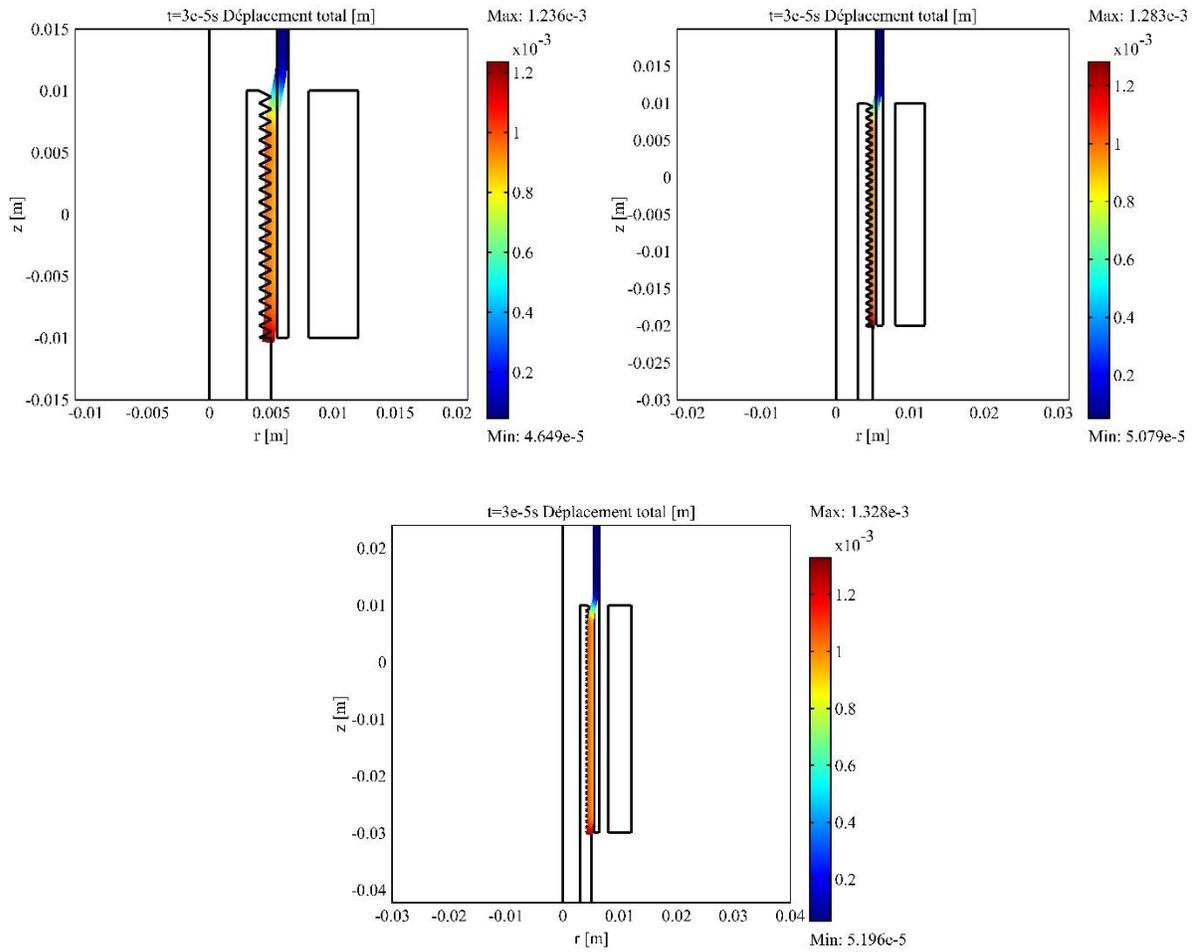


Figure III.14 : Déformation des systèmes simulés avec différentes longueurs du filetage 20mm, 30mm et 40mm.

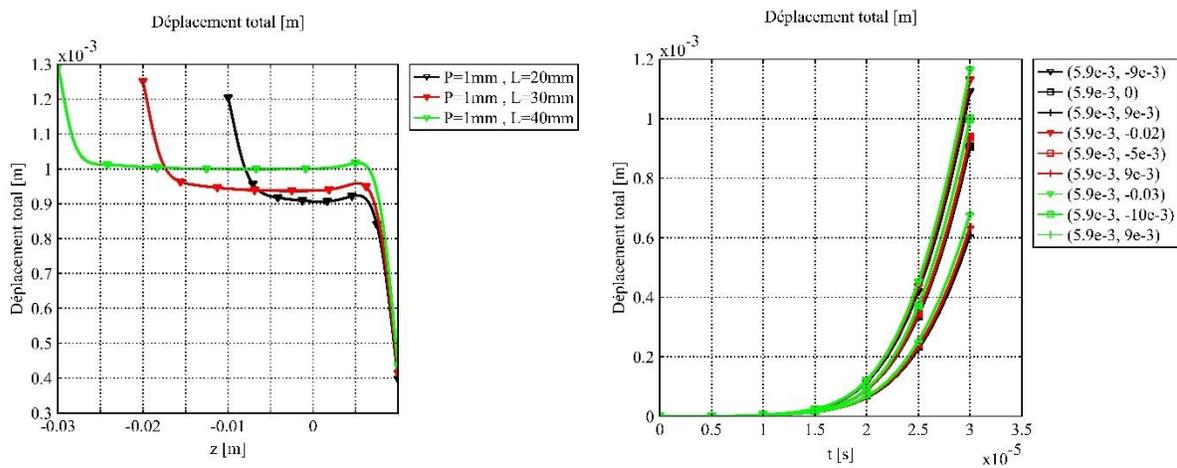
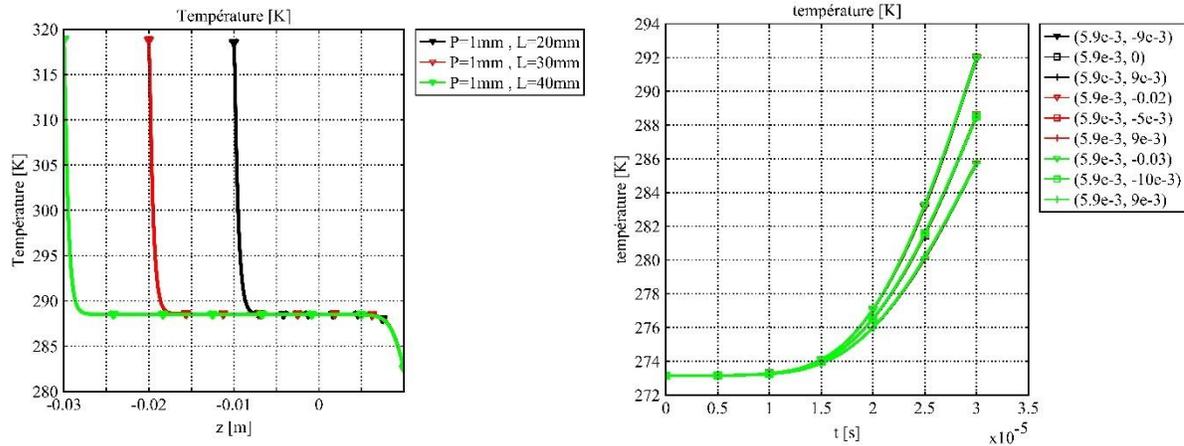


Figure III.15 : (a) Déformation le long du tube serti pour les différentes longueurs du filetage, (b) Variation dans le temps du déplacement des points considérés



**Figure III.16 : (a) Température le long du tube serti pour les différentes longueurs du filetage, (b) Variation dans le temps de la température des points considérés**

#### III.6.4.4 Effet de la largeur du pitch

Dans une autre étude paramétrique, nous avons analysé l'effet de la largeur du filetage du tube intérieur. Pour cela, nous avons considéré trois installations similaires à la précédente mais avec trois tubes intérieurs de filetages triangulaires dont les pitches sont de différentes largeurs : 1mm, 2.5mm et 3mm (figures III. 17 (a)-(b)).

Les résultats numériques de simulation permettent de conclure que ce paramètre influe aussi sur la déformation du tube extérieur lors du SRTEM, particulièrement lorsqu'il s'agit d'une grande largeur de pitch (figures III. 17-18 (a)). C'est à dire que le SRTEM est bien favorisé avec des filetages de grandes largeurs.

Cependant, la température des tubes sertis est évidemment in affectée par ce paramètre géométrique (figures III. 18 (b)).

Ces résultats sont théoriquement et expérimentalement qualitativement validés [66].

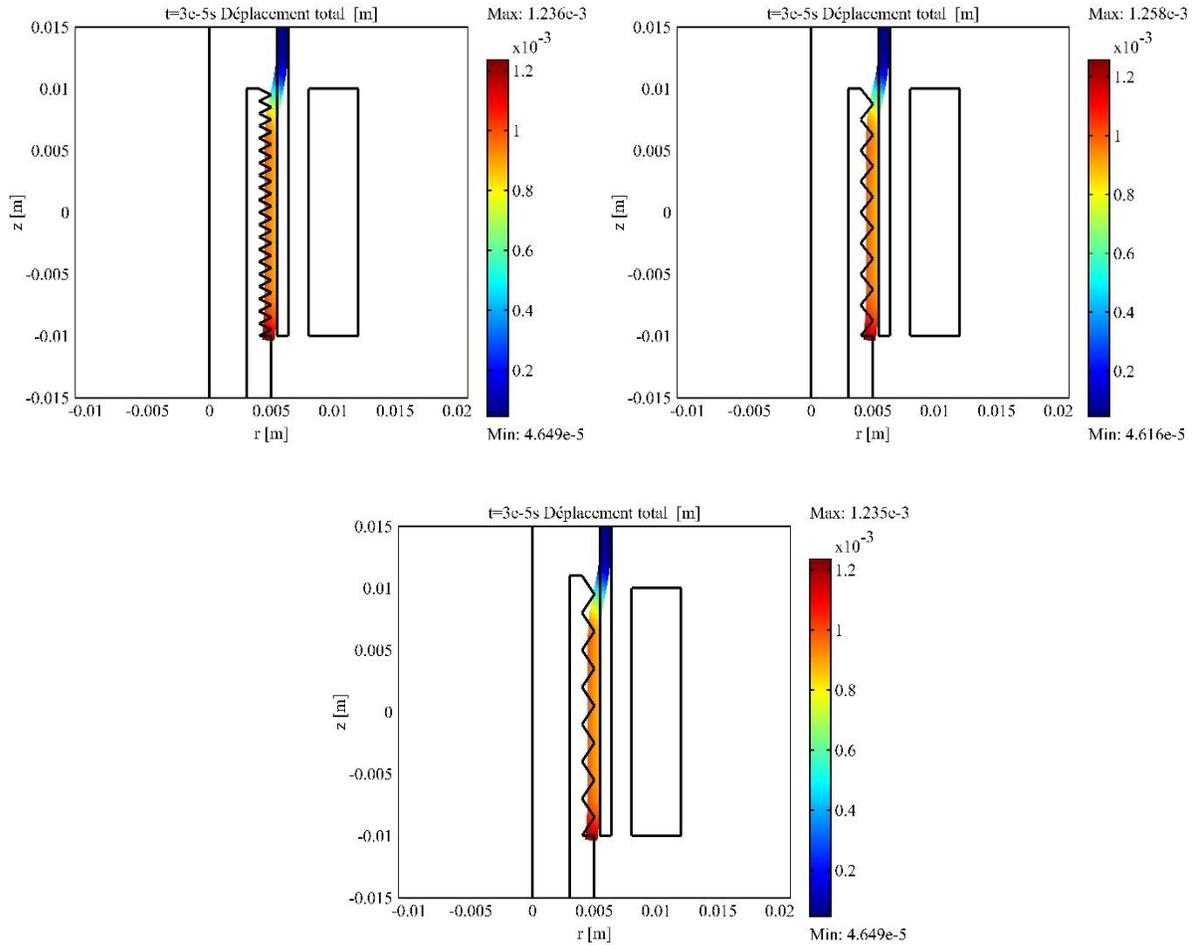


Figure III.17 : Déformation des différents systèmes simulés avec différents pitch de différentes largeurs 1mm, 2.5mm et 3mm

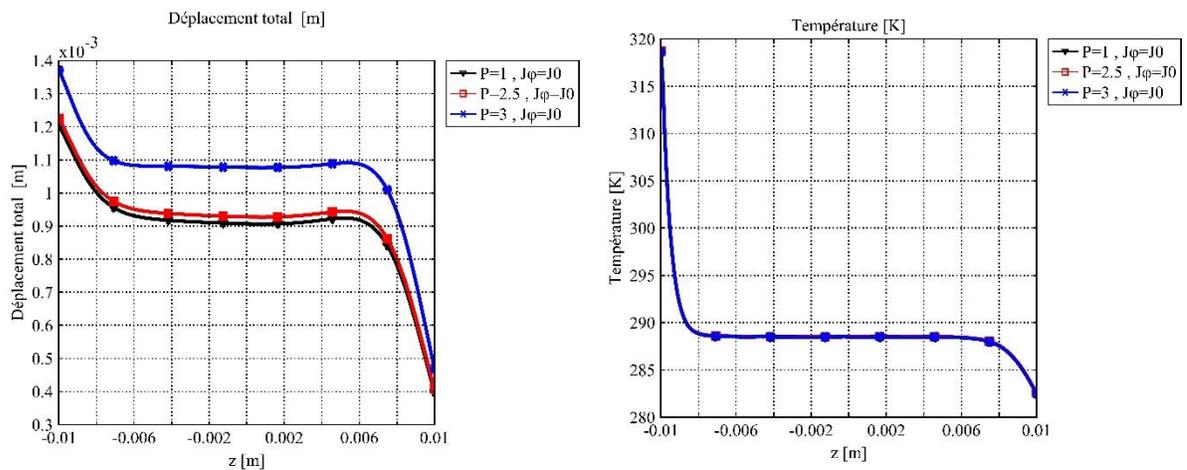


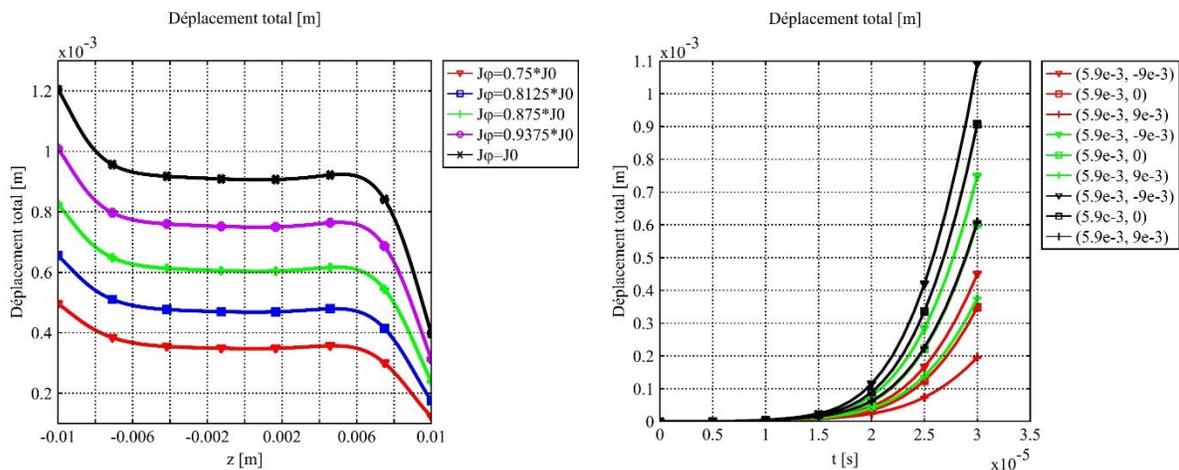
Figure III.18 : (a) Déformation le long du tube serti pour différentes largeurs du pitch, (b) Température le long du tube serti pour différentes largeurs du pitch.

### III.6.4.5 Effet de l'énergie du générateur

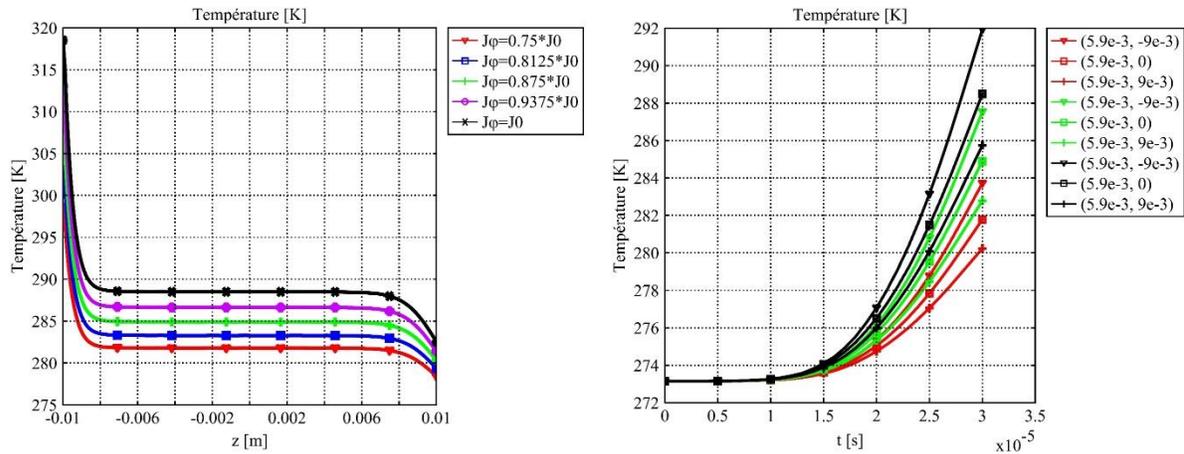
En considérant l'installation de base du sertissage comprenant un filetage triangulaire de longueur 20mm avec un pitch de largeur 1mm, nous avons étudié l'effet de l'énergie du générateur représentée, par le courant de décharge considéré dans la simulation numérique.

Comme il est prévisible théoriquement, l'énergie du générateur du sertissage et par conséquent, le courant inducteur est un facteur important de ce processus et favorise son efficacité ainsi que la formabilité et la déformation du tube extérieur lors du SRTEM. Les résultats numériques (figure III. 19 (a)-(b)) confirment l'effet de ce paramètre.

En effet, l'énergie du générateur et donc le courant de décharge sont responsables de la création des courants induits au niveau du tube extérieur et par conséquent des forces magnétiques qui engendrent la déformation et le sertissage de ce dernier, ce qui explique la proportionnalité entre l'énergie appliquée et la déformation lors du SRTEM. Cependant, l'influence de ce paramètre sur le réchauffement du tube serti n'est pas très notable (figure III. 20(a) (b)).



**Figure III. 19 : (a) Déformation le long du tube serti pour les différentes énergies, (b) Variation dans le temps de la déformation des points considérés pour les différents courants extérieurs**



**Figure III. 20 : (a) Température pour les différents courants, (b) Variation dans le temps de la température aux points considérés pour les différentes énergies**

#### III.6.4.6 Effet de la forme de l'inducteur

En considérant l'installation précédente du sertissage avec le même générateur (même courant de décharge), nous avons considéré un autre inducteur de mêmes dimensions (Tableau III. 1) mais de forme spirale avec trois spires (figure III. 21).

A partir des résultats de simulation, plusieurs constatations peuvent être faites (figure III. 21-22-23) :

- La plus importante remarque est que la déformation du tube extérieur n'est pas uniforme à cause de la forme spirale de l'inducteur, le sertissage est plus important au niveau des parties faces aux spires. La même remarque est faite pour la température du tube serti.
- D'autre part, en comparant la déformation des tubes sertis avec inducteur massif et celui spiral, nous pouvons conclure que le sertissage est bien meilleur avec un inducteur massif puisque la déformation du tube serti est plus importante. Concernant la température du tube extérieur, la même constatation peut être faite.
- En outre, un système de sertissage, avec un même générateur, à l'aide d'un inducteur spiral nécessite plus de temps.

Nous pouvons conclure que le SRTEM à l'aide d'un inducteur massif est beaucoup plus important que celui avec un inducteur solénoïde, ce qui explique l'utilisation de plus en plus répandue des conformateurs de champ [65-66].

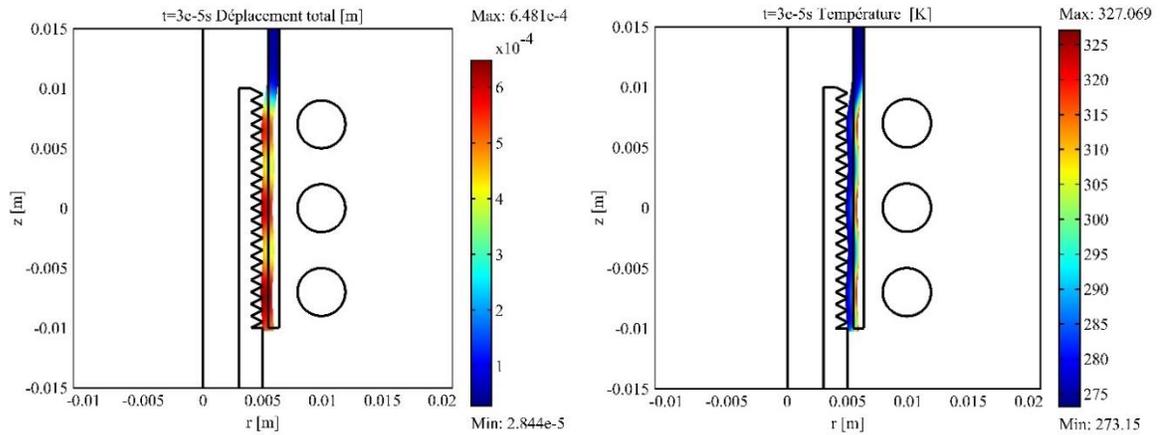


Figure III.21 : (a) Déformation totale obtenue avec l'inducteur spiral. (b) Température du tube serti obtenue en utilisant l'inducteur spiral

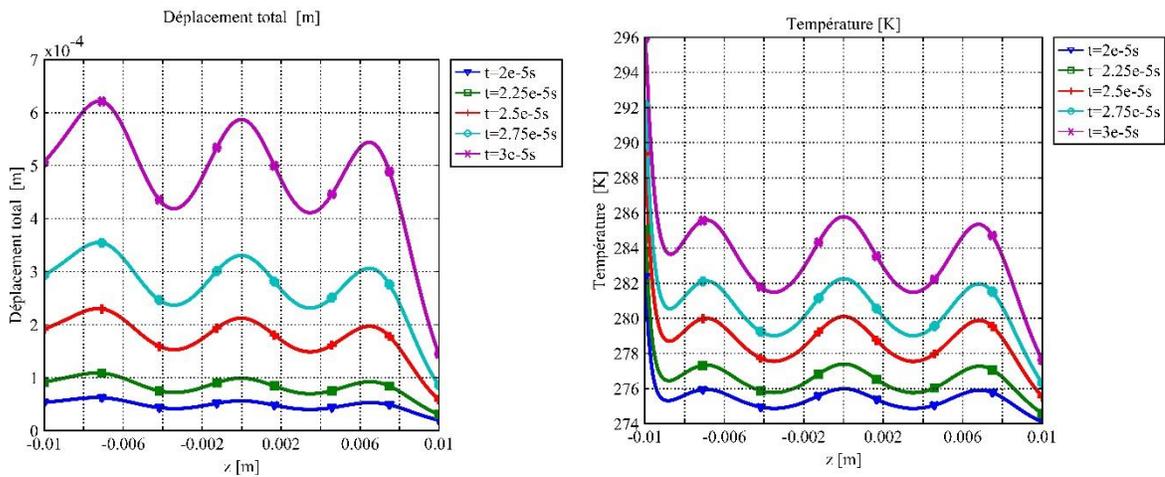


Figure III.22 : (a) Déformation le long du tube serti avec inducteur spiral, (b) Variation dans le temps de la température le long du tube serti avec inducteur spiral

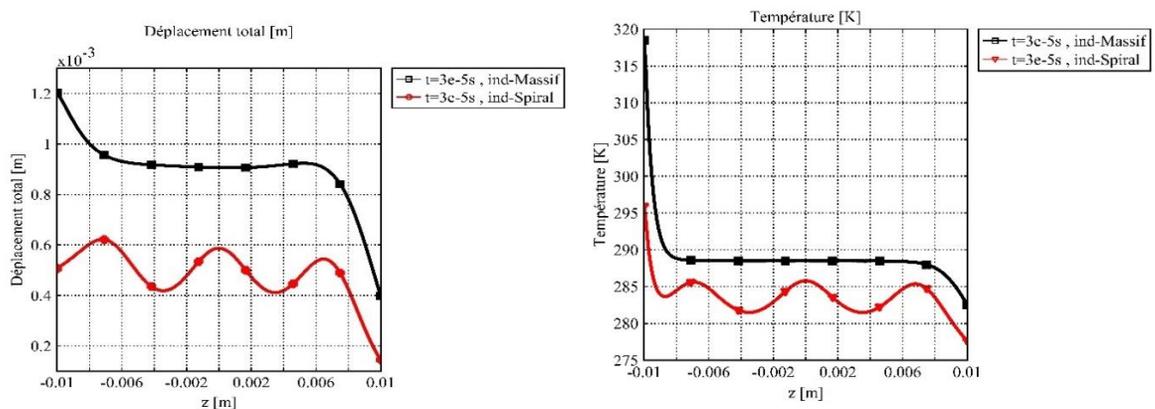


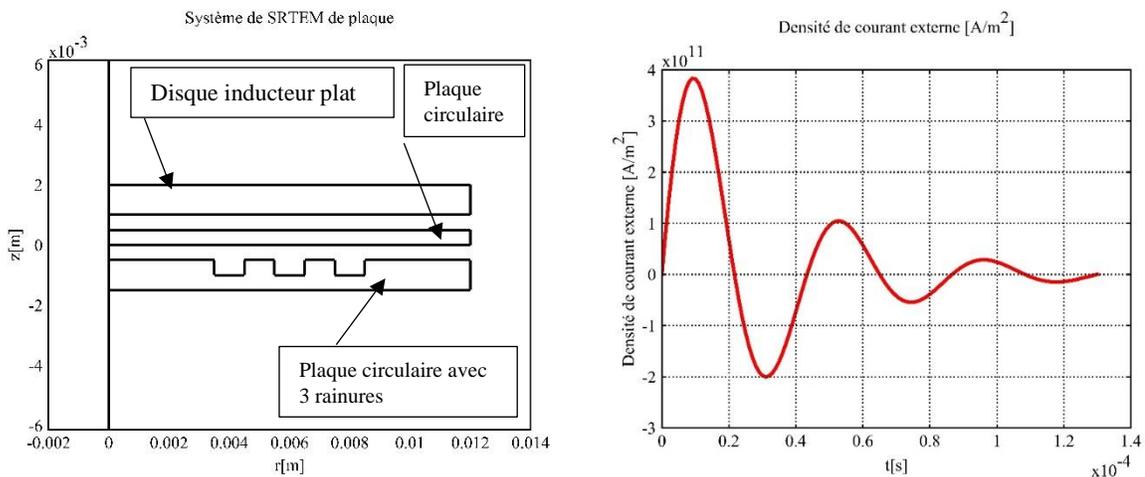
Figure III.23 : (a) Déplacement le long du tube serti avec inducteur massif et spiral, (b) Température le long du tube serti avec inducteur massif et spiral

### III.7 Sertissage électromagnétique des pièces plates

Une autre application du SRTEM est le sertissage où la pièce sertie est une plaque plate. L'installation considérée dans notre simulation suivante comporte un disque inducteur plat de rayon 12mm et d'épaisseur 1mm, situé au-dessus d'une plaque circulaire de même rayon et d'épaisseur 0.5mm, distants de 0.5mm. Cette plaque est sertie avec un autre disque plat de même rayon et d'épaisseur 1mm, muni de trois rainures (grooves) de largeur 1mm et de 0.5mm de profondeur (figure III. 24 (a)).

De plus, le courant de décharge (III. 3), considéré numériquement au niveau de l'inducteur est toujours de même forme, impulsionnel amorti (figure III. 24 (b)).

$$J_{\varphi} = 5,2 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-3 \cdot 10^4 \cdot t) \cdot \sin(1,45 \cdot 10^5 \cdot t) \quad (\text{III. 3})$$

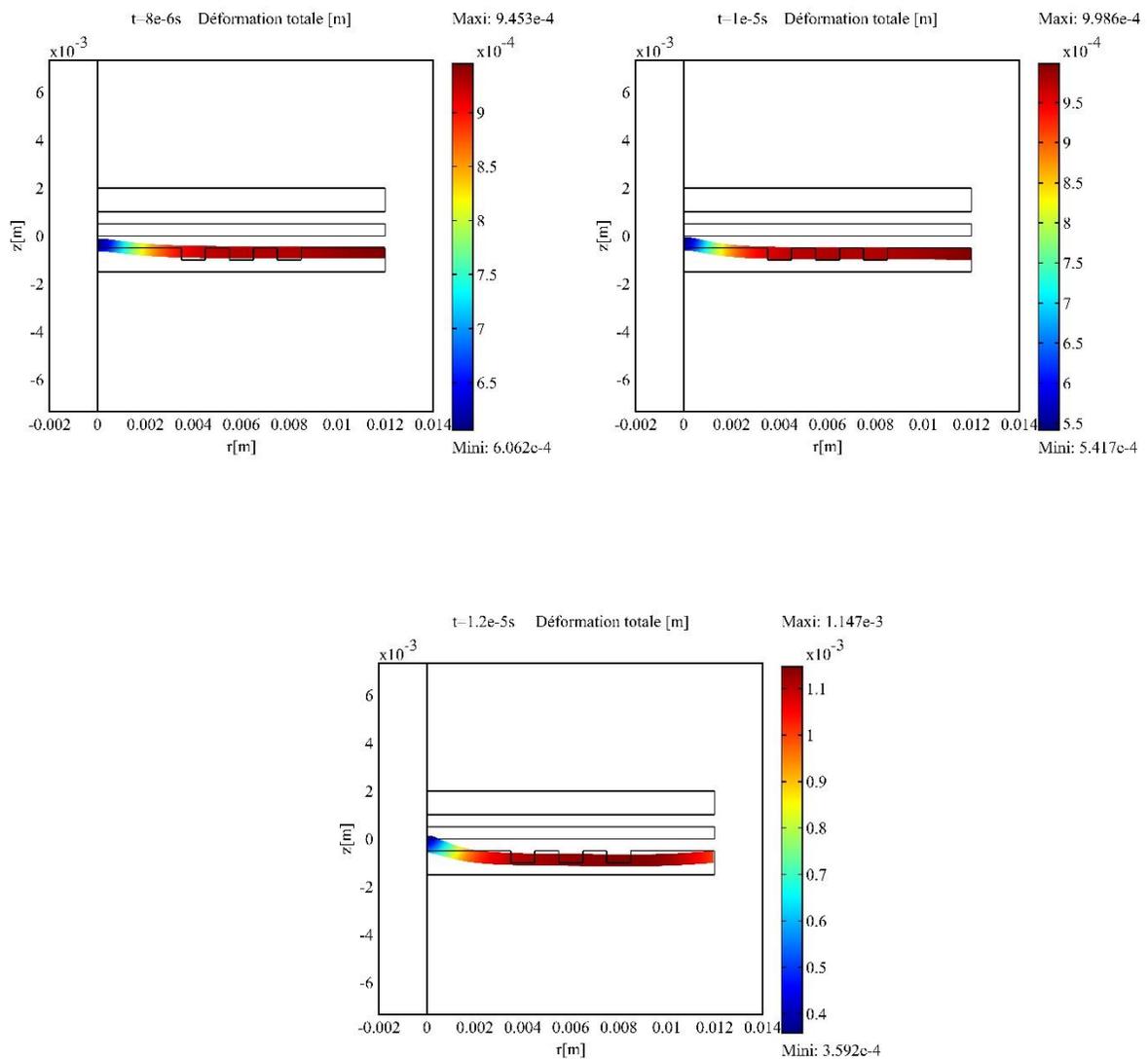


**Figure III.24 : (a) Installation de SRTEM de plaque, (b) Courant inducteur considéré dans la simulation**

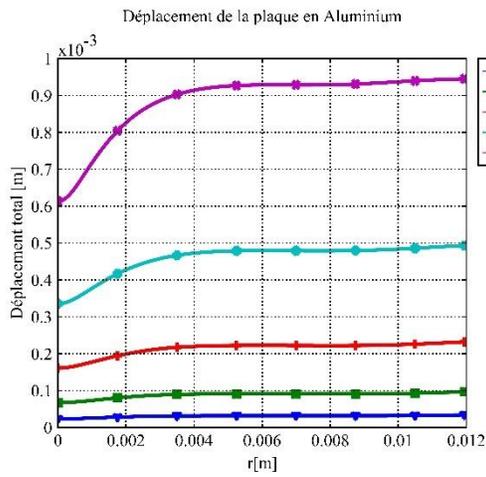
D'autre part, en considérant le sertissage de trois différentes plaques de différents matériaux (Aluminium, Cuivre et Magnésium), nous pouvons conclure une fois de plus que l'aluminium est le matériau le plus prometteur et le plus utilisé pour le processus de formage électromagnétique, particulièrement le SRTEM, puisqu'il est le plus facile et le plus rapide à déformer plastiquement, grâce à ses propriétés mécaniques (figure III. 25-26 (a)-(d)), contrairement au cuivre qui n'est utilisé que rarement, à cause de sa faible formabilité (figure III. 25-26(b)(d)).

En outre, le magnésium est un matériau qui nécessite plus de temps de sertissage, mais présente une bonne formabilité, ce qui explique son utilisation de plus en plus répandue dans l'industrie à cause de sa légèreté (figure III. 25-26 (c) (d)).

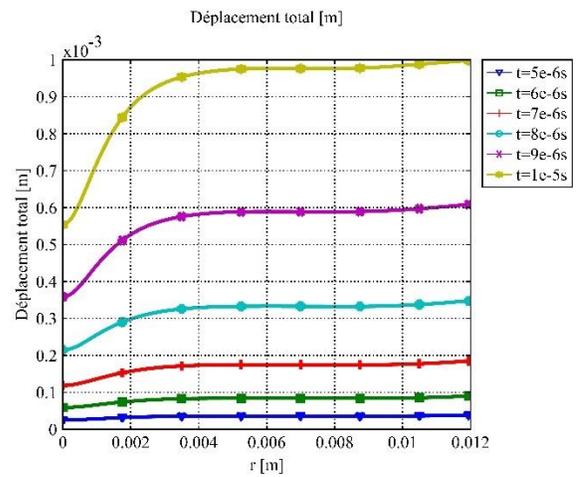
Concernant la température des plaques serties, nous pouvons remarquer que le magnésium est celui qui présente le plus grand gradient de température au niveau de la plaque sertie. Néanmoins le cuivre et l'aluminium se rapproche du point de vue thermique (figure III. 27).



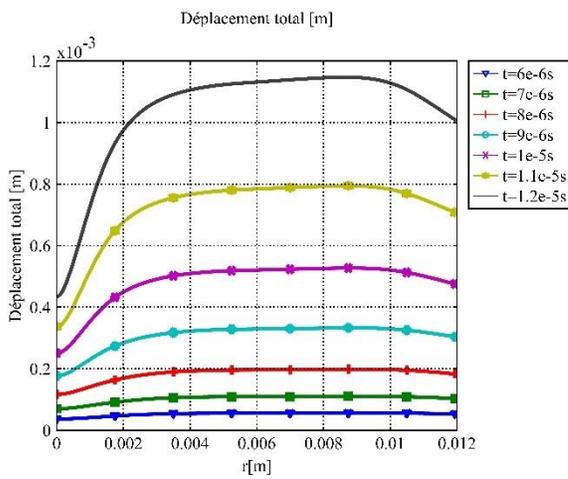
**Figure III.25 : (a) Sertissage de la plaque en aluminium, (b) Sertissage de la plaque en cuivre, (c) Sertissage de la plaque en magnésium**



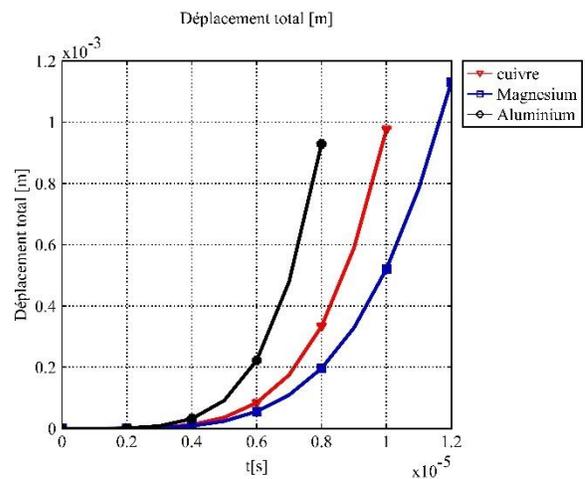
(a) Aluminium



(b) Cuivre

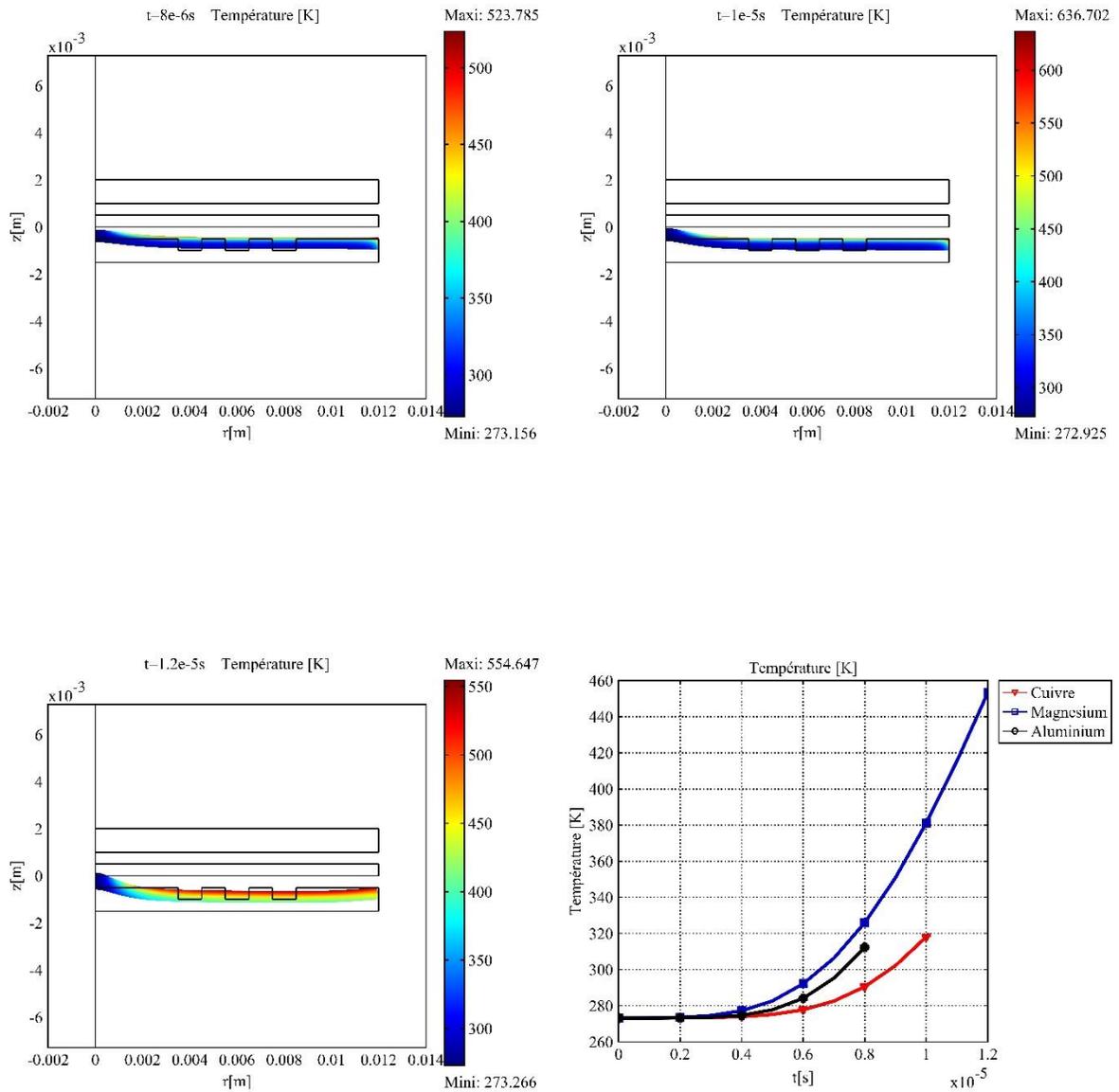


(c) Magnésium



(d)

**Figure III.26 : (a) Déplacement le long du rayon de la plaque en Aluminium, (b) Déplacement de la plaque en Cuivre, (c) Déplacement de la plaque en Magnésium, (d) Déplacement dans le temps du milieu des plaques**



**Figure III.27 : (a) Température de la plaque en Aluminium, (b) Température de la plaque en Cuivre, (c) Température de la plaque en Magnésium, (d) Comparaison de la température du milieu des trois plaques**

**III.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, les résultats des différentes applications simulées ont été présentés et interprétés. En effet, les simulations numériques de différentes applications expérimentales du processus de SRTEM, ont été menées sous environnement Comsol, permettant le couplage des différents phénomènes mis en jeu notamment le phénomène électromagnétique, mécanique et thermique et cela pour le sertissage électromagnétique de tubes et celui de plaques.

Des études paramétriques ont été analysées pour mettre en évidence l'effet de certains paramètres géométriques et physiques sur la formabilité des pièces serties, la faisabilité de ce processus et son efficacité.

Tous les résultats numériques sont validés théoriquement et expérimentalement par des travaux antérieurs [65-66].

# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale**

L'objectif global de notre travail était de développer un modèle numérique de simulation pour le sertissage électromagnétique (SRTEM) appliqué à des tubes et des plaques. Cet outil visait à prédire la réalisation du SRTEM et à contribuer à la compréhension du processus. La recherche bibliographique et l'état de l'art ont clairement démontré la nécessité du développement de modèles de simulation pour cette technique innovante.

Pour modéliser le processus de SRTEM, nous avons développé des modèles numériques éléments finis sous environnement COMSOL MULTIPHYSICS, qui intègrent tous les phénomènes physiques impliqués dans le SRTEM. En effet, ces modèles utilisent le couplage fort du problème électromagnétique, mécanique et thermique, dans le but d'étudier, analyser ce processus de SRTEM et son efficacité et simuler des systèmes pratiques utilisant cette technique.

Nos prédictions numériques ont été comparées aux résultats expérimentaux, et un accord satisfaisant a été obtenu. Les simulations numériques ont pu être appliquées avec précision aux applications industrielles du processus de SRTEM, qu'il s'agisse de plaques ou de tubes. Notre objectif était double : prédire avec précision les propriétés finales des pièces soudées et contrôler les paramètres de base des installations et systèmes se basant sur ce processus. En outre, des études paramétriques ont aussi été menées, permettant d'étudier l'effet de certains paramètres physiques et géométriques sur les performances de ce procédé et son efficacité.

Cette étude a permis de constituer une vaste base de données qui servira de référence pour les futurs travaux. Elle a également ouvert de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine des technologies par impulsion électromagnétique et à haute vitesse.

Pour l'avenir, il serait intéressant d'améliorer et perfectionner ces modèles numériques développés, pour des simulations plus réalistes de ces processus. Tout d'abord, il serait pertinent d'inclure tous les phénomènes physiques et paramètres négligés dans nos simulations, tels que l'effet de l'inductance mutuelle. De plus, il serait judicieux d'étendre ces modèles aux applications tridimensionnelles, car de nombreux processus de SRTEM sont non axisymétriques et présentent des géométries complexes. Enfin, l'étude de l'influence de paramètres géométriques et physiques supplémentaires, tels que la température, l'inductance mutuelle, la nature du matériau de la bobine et sa perméabilité et l'utilisation du conformateur de champ, pourrait enrichir encore plus la simulation et la modélisation des procédés de SRTEM et les techniques d'assemblage par impulsion magnétique, de manière générale.

## Bibliographie

- [1] Kang, J. W., Zhang, S., Bui Thi, T. A., et al. « Friction assisted dissimilar solid state lap joining of aluminum and copper pipes ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023, Volume 24, 199–208. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00745-9>
- [2] Woo, M. A., Kim, H. K., Park, H. G., Kim, Y. H., Song, W. J., & Kim, J. « Numerical and experimental study on electrohydraulic forming process ». *Procedia Engineering*. 2017, Volume 207, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.780>
- [3] Daehn, G. « High-velocity metal forming, metalworking: Sheet Forming ». *ASM Handbook*. 2006, Volume 14B, édité par S.L. Semiatin, ASM International, pp. 405–418. <https://doi.org/10.31399/asm.hb>
- [4] Kumar, D., Kore, S. D., & Nandy, A. « An interference-fit joining of Cu-Ss composite tubes by electromagnetic crimping for different surface profiles ». *Welding in the World*. 2020, Volume 65, 1031–1050. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01081-8>
- [5] Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B., Tekkaya, A., & Kleiner, M. « Electromagnetic forming—a review ». *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, Volume 211, pp. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
- [6] Bruno, E. J. (Éd.). *High-velocity forming of metals (Rev.)*. Dearborn: ASTME, 1968
- [7] Gayakwad, D., Dargar, M. K., Sharma, P. K., Purohit, R., & Rana, R. S. « A review on electromagnetic forming process ». *Procedia Materials Science*. 2014, Volume 6, pp. 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.066>
- [8] Wikipedia. *Arc welding* [en ligne]. (15 janvier 2001, mise à jour 21 juin 2024). Disponible sur : [https://en.wikipedia.org/wiki/Arc\\_welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Arc_welding) (consulté le 21 MARS 2024).
- [9] Wikipedia. *Magnetic pulse welding* [en ligne]. (19 mai 2004, mise à jour 16 mai 2024). Disponible sur : [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_pulse\\_welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_pulse_welding) (consulté le 21 juin 2024).
- [10] Manoharan, P., Manogaran, A. P., Priem, D., Marya, S., & Racineux, G. « State of the art of electromagnetic energy for welding and powder compaction ». *Welding in the World*. 2013, Volume 57, Numéro 6, pp. 867–878. doi:10.1007/s40194-013-0080
- [11] Ilhem Boutana, MR Mekideche. « [Simulation of aluminum sheet electromagnetic forming with several dies](#) ». *5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Jordanie, 2008.

- [12] Ilhem Boutana Hafsaoui, "Étude et Modélisation numérique Tridimensionnelle des Effets Mécaniques du Champ Electromagnétique", thèse de doctorat de l'université du Jijel, 2008.
- [13] Schäfer, R., Pasquale, P., & Elsen, A. « Material Hybrid Joining of Sheet Metals by Electromagnetic Pulse Technology ». *Key Engineering Materials*. 2011, Volume 473, pp.61-68.
- [14] Zhou, J., & Tsai, H. « Effects of Using an External Electromagnetic Force on Transport Phenomena and Weld Quality in Laser Welding ». *Proceedings of the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. Rio Grande, Puerto Rico (USA), Volume 1, 937-942, July 8–12, 2012.
- [15] Ludwig, Andreas. « MCWASP XIII: International Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Lieu de la conférence (Pays), Volume 33, Numéro 011001, 2012.
- [16] Thibaudeau, Emmanuel, et Kinsey, Bradley L. « Analytical Design and Implementation of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Forming and Welding ». *Proceedings of the ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 41st North American Manufacturing Research Conference*. Madison, Wisconsin, USA, Volume 1: Processing, V001T01A015, 10–14 juin 2013. ASME. <https://doi.org/10.1115/MSEC2013-1238>.
- [17] Nissley, Nathan, Anderson, Timothy, Noecker II, Caleb Roepke, Gallagher, Morgan, et Hukle, Martin. « Dissimilar Metal Welding of Nitronic 50 HS® and 25% Cr Super Duplex Stainless Steel ». *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*. Volume 5, 2014. <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24706>.
- [18] Mohamed, Nurul, et Alias, J. « A review on the effect of welding on the corrosion of magnesium alloys ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 257, 2017, 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012028>.
- [19] Khan, Mohammed Rajik, Hossain, Md, Sharma, Archana, et Kumar, Satendra. « Predicting the Effect of Field Shaper in Electromagnetic Welding Using FEM ». *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018, Volume 44. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3430-9>.
- [20] Tanaka, Y., Fujino, T., et Iwao, T. « Review of Thermal Plasma Simulation Technique ». *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2019, Volume 14, 1582-1594. <https://doi.org/10.1002/tee.23040>.
- [21] Heßmann, Jennifer, Marcel Bachmann, et Kai Hilgenberg. « Numerical and Experimental Investigation of Controlled Weld Pool Displacement by Electromagnetic Forces for Joining Dissimilar Materials ». *Metals*. 2020, Volume 10, Numéro 11, page 1447. <https://doi.org/10.3390/met10111447>.
- [22] Ayaz, Mohsen, Mehrdad Khandaei, et Yaser Vahidshad. « Design and optimization of an integrated multi-layer coil for decreasing the discharge energy in electromagnetic welding using

numerical and experimental methods ». *Welding in the World*. 2021, Volume 65, pages 211–227. DOI: [10.1007/s40194-020-01010-1](https://doi.org/10.1007/s40194-020-01010-1).

[23] Shao, H., et al. « Improved Coil Design for Magnetic Pulse Welding of Metallic Sheets ». *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022, Volume 6, Numéro 6, page 144. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6060144>

[24] Springer. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* [en ligne]. (Juin 2020, avril 2024). Disponible sur : <https://link.springer.com/journal/42417> (consulté le 1 juin 2024).

[25] Ilhem Boutana, A : Bahloul, S. Boukendir. « Numerical investigation on weldability of workpieces using magnetic pulse welding process ». *IEEE International Conference on Design & Test of Integrated Micro& Nano-Systems (DTS)*. Tunisie, 2021.

[26] Ilhem Boutana, S. Boufferroum, A. Laouira. « Modeling of the innovative magnetic pulse joining technology ». *19th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Algerie, 2022.

[27] Ilhem Boutana, M. A. Boussalam, A. Laouira, S. Boufferroum, « 3D modelling of the mechanical behaviour of magnetic forming systems ». *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2022, 11 (4), 1807-1817.

[28] Ilhem Boutana MR Mekideche, H. Bali. « Analysis Model And Numerical Investigation Of Electromagnetic Tube Expansion With Field Concentrator ». *20th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Tunisie, 2023.

[29] Aizawa, Tomokatsu, Mehrdad Kashani, et Keigo Okagawa. « Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC steel sheet joints ». *Welding Journal*. 2007, Volume 86, Numéro 5, pp. 119-124.

[30] Aizawa, Tomokatsu, Keigo Okagawa, et Mehrdad Kashani. « Application of magnetic pulse welding technique for flexible printed circuit boards (FPCB) lap joints ». *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, Volume 213, Numéro 7, pp. 1095-1102. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.004>.

[31] Gallio, Giuseppe, Mario Perris, Marie Morel, Sonia Bernard Dos, et Daniel Jouaffre. *Vehicle wheel manufactured by magnetic pulse welding: U.S. Patent Application 16/356,165*. 2019.

[32] Kumar, R., S. Sahoo, B. Sarkar, et A. Shyam. « Development of electromagnetic welding facility of flat plates for nuclear industry ». *Journal of Physics: Conference Series*. 2016, Volume 759, Numéro 1, pp. 12-55. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/759/1/012055>. IOP Publishing.

[33] Sharma, Surender Kumar, et Archana Sharma. « Electromagnetic welding of tubular joints for nuclear applications ». *Strengthening and Joining by Plastic Deformation: Select Papers from AIMTDR 2016*. Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 217-246. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0378-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0378-4_10).

- [34] Nachappa, N., Stefan Frei, et Steven J. Sytsma. *Magnetic Pulse Welding of Engine Components: U.S. Patent Application 15/337,177*. 2018.
- [35] ZITTEL, G. « A Historical Review of High-Speed Metal Forming ». *Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming - ICHSF 2010*. Columbus, Ohio (États-Unis), 9-10 mars 2010. Institut für Umformtechnik - Technische Universität Dortmund, 2010. <https://doi.org/10.17877/DE290R-8687>
- [36] WENYING, Z., KUANGDI, X. « High-Frequency Welding ». *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, édité par KUANGDI, X. Springer, Singapore, 2023. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1\\_1376-1](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1376-1).
- [37] KAPITZA, P. L., RUTHERFORD, E.. « A method of producing strong magnetic fields ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 2 juin 1924, Volume 105, Numéro 734, pp. 691-710.
- [38] RAJAK, A. K., KORE, S. D.. « EXperimental investigation of aluminium–copper wire crimping with electromagnetic process: its advantages over conventional process ». *Journal of Manufacturing Processes*. 2017, Volume 26, pp. 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.009>.
- [39] KAPIL, A., SHARMA, A. « Magnetic pulse welding: an efficient and environmentally friendly multi-material joining technique ». *Journal of Cleaner Production*. 2015, Volume 100, pp. 35-58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.042>.
- [40] OLIVEIRA, Ines Vieira de. *Pulse Technology as a Tool for Multi-Material Joining*. Thèse de doctorat. Génie mécanique. portugal: Technische Universität de porto, 2018.
- [41] KUMAR, R., KORE, S.D. « Effects of surface profiles on the joint formation during magnetic pulse crimping in tube-to-rod configuration ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2017, Volume 18, Numéro 8, pp. 1181-1188. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0138-9>..
- [42] SHIM, Ji-Yeon, KANG, Bong. « Development of Cable Lug Joint Using Electromagnetic Force ». *Journal of Manufacturing Engineering & Technology*. 2013, Volume 22, pp. 156. <https://doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.1.156>
- [43] SIDDIQUI, Muhammad Ali. *Numerical modelling and simulation of Electromagnetic Forming Process*. Thèse de doctorat. Mécanique des fluides et des solides. Strasbourg : Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, 2009.
- [44] Salon, S. J. « Finite element analysis of electrical machines ». *Kluwer Academic Publishers*,1995, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2349-9>
- [45] Guglielmetti, Aurore. *Etude numérique du soudage par impulsion magnétique*. Thèse de Doctorat. Mécanique Avancée. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi,2012.

- [46] Pereira, D., Oliveira, J.P., Santos, T.G., Miranda, R.M., Lourenço, F., Gumpinger, J., et al. « Aluminium to carbon fiber reinforced polymer tubes joints produced by magnetic pulse welding ». *Compos Struct.* 2019, Volume 230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111512>
- [47]: Kaiser, M., Himmel, N. « Carbon Fiber Reinforced Plastics — Trendsetting Material for High Performance Racing Bike Chassis ». *The Engineering of Sport 6*. In : Moritz, E.F., Haake, S. (éds). Springer, New York, NY, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-45951-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-0-387-45951-6_23)
- [48] Dogan, B. « Hydrogen Storage Tank Systems and Materials Selection for Transport Applications ». *Proceedings of the ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*. Vancouver, BC, Canada, Volume 6: Materials and Fabrication, pp. 571-578, 23-27 juillet 2006. DOI : <https://doi.org/10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93868>.
- [49] Barik, T., Sarangi, S., Pal, K. « Assessment on Hole Quality During Drilling of Al/CFRP Stack ». *Advances in Unconventional Machining and Composites: Proceedings of AIMTDR2018*. Singapore, pp. 757-770, 23 November 2019. DOI : <https://doi.org/10.1007/978-981-3>.
- [50] Birdsall, D. F. « Magnetic Forming! What is it ». *American Machine/Metalwork Manufacturing*, 1961, Volume 105, Numéro 6, pp. 117-121.
- [51] Weddeling, C., Woodward, S. T., Marré, M., Nellesen, J., Psyk, V., Tekkaya, A. E., Tillmann, W. « Influence of Groove Characteristics on Strength of Form-Fit Joints ». *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, Volume 211, Numéro 5, pp. 925-935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.004>
- [52] Sapanathan, T., Raoelison, R. N., Buiron, N., Rachik, M. « Magnetic Pulse Welding: An Innovative Joining Technology for Similar and Dissimilar Metal Pairs ». Dans M. Ishak (Éd.), *Joining Technologies*. Intech Open, 2016. DOI : <https://doi.org/10.5772/63525>
- [53] Zaouïa, M. *Modélisation numérique du couplage électromagnétique-mécanique dans les structures linéaires tubulaires*. Mémoire de Magister. Génie Mécanique. Alger : École Militaire Polytechnique, 2013.
- [54] Belfares, Dj., et Touati, Y. *Modélisation électromagnétique et mécanique de l'expansion d'un tube par magnétoformage*. Mémoire de fin d'études. Génie Mécanique. Bejaia : Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [55] Jiamming, Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- [56] Rapetti, F. *Approximation des équations de la magnétodynamique en domaine tournant par la méthode des éléments avec joints*. Thèse de Doctorat. Mathématiques Appliquées. Paris : Université Paris 6, 2000.
- [57] Nguyen, MC. *Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG*. Thèse de Doctorat. Génie Mécanique. Aix-en-Provence : Université d'Aix-Marseille, 2015.

- [58] WIKIPEDIA. *Loi de Hooke* [en ligne]. (23 avril 2019, mise à jour le 10 janvier 2024). Disponible 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) (consulté le 25 MARS 2024).
- [59] Arpaci, V., Salamet, A., Kao, S., et Jaluria, Y. « Introduction to Heat Transfer ». *Appl. Mech. Rev.* Mars 2002, Volume 55, Numéro 2, B37–B38. DOI : <https://doi.org/10.1115/1.1451231>
- [60] COMSOL. *COMSOL Multiphysics 3.5* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.comsol.com> [consulté le 21 MARS 2024].
- [61] PeeteenutTriwong. *Modélisation numérique 3D des phénomènes couplés dans les procédés d'élaboration par induction : couplage faible et couplage fort*. Thèse de doctorat. Génie électrique. Grenoble : Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [62] BOUSBA, A., et NEDJARI BENHADJ ALI, Y. *Etude et Modélisation d'Applications Industrielles du Formage Electromagnétique*. Mémoire de Master en Electromécanique. Jijel: Université de Jijel, 2017.
- [63] WATANABE, M., KUMAI, S. « High-speed deformation and collision behavior of pure aluminum plates in magnetic pulse welding ». *Materials Transactions*. 2009, Vol. 50, No. 8, pp. 2035-2042. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-M2009816>
- [64] XIAOLONG, W., HUI, Y., GUANGLIANG, L. « 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, 2011, Vol. 3, pp. 266-272.
- [65] Deepak Kumar, Shafeeque E. S., Sachin D. Kore, Arup Nandy, «Electromagnetic Crimping on Threaded Surface: FEM Modelling, Validation and Effects of Pitch and Discharge Energy on Deformation in an Empirical Relation » ,2021
- [66] Kumar, Deepak, Kore, Sachin D., et Nandy, Arup. « Interference-fit joining of Cu-SS composite tubes by electromagnetic crimping for different surface profiles ». *Welding in the World*. 2021, Volume 65, Numéro 1031–1050. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40194-021-01081-8>

## RESUME

La technologie de Sertissage électromagnétique (SRTEM) est un processus de formage à grande vitesse qui utilise des forces magnétiques pour déformer et joindre les pièces. Le SRTEM est un processus d'assemblage, par impulsions électromagnétiques, et se caractérise par le contact non existant entre la pièce conductrice et l'outil. La déformation de la pièce est engendrée par les forces de Lorentz. Celles-ci sont créées par une décharge rapide d'un courant transitoire intense à travers une bobine, ce qui induit un champ magnétique transitoire opposé dans la pièce de travail, entraînant l'interaction répulsive entre la bobine et la pièce à sertir. Le présent mémoire vise à étudier et analyser ce processus en développant des modèles numériques éléments finis avec le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

**Mots clés :** Formage électromagnétique, soudage par impulsion magnétique, sertissage électromagnétique, modélisation numérique, Comsol Multiphysics.

## ABSTRACT

Electromagnetic Crimping Technology (EMC) is a high-speed forming process that uses magnetic forces to deform and join parts. EMC is from the lineage of the Electromagnetic Pulse Technology, and it is characterized by the non-existing contact between the workpiece and the tool. The deformation of the workpiece is a result of the Lorentz forces. These are due to a fast discharge of an intense transient current through a coil, which will induce an opposite transient magnetic field in the workpiece, resulting in the repulsive interaction between the coil and the workpiece. The present dissertation intends to promote the study and analysis of this process by developing numerical models with finite element Multiphysics software that is COMSOL MULTIPHYSICS.

**Keywords:** Electromagnetic Forming, Magnetic Pulse Welding, Electromagnetic Crimping, Numerical Modeling, COMSOL Multiphysics.

## ملخص

تقنية التقليد الكهرمغناطيسي هي عملية تشكيل عالية السرعة تستخدم قوى مغناطيسية لتشوه الأجزاء والجمع بينها. هي من سلالة تكنولوجيات النبض الكهرمغناطيسي، وهي تتميز بالاتصال غير الموجود بين قطعة العمل والأداة. تشوه قطعة العمل هو نتيجة لقوات لورنتز. هذه هي نتيجة لتفريغ سريع لميض عابر حاد من خلال الملف، الذي سوف يحفز حقل مغناطيسي عابر معاكس في قطعة العمل، مما يؤدي إلى التفاعل الاهتزازي بين الملف وقطعة العمل. ويهدف هذا البحث إلى تعزيز دراسة هذه العملية وتحليلها عن طريق وضع نماذج رقمية ذات برامجيات متعددة الفيزياء ذات عناصر محدودة، وهي برامجيات كومسول المتعددة التخصصات

**الكلمات المفتاحية:** التشكيل الكهرمغناطيسي، اللحام بالنبض المغناطيسي، التقليد الكهرمغناطيسي، النمذجة العددية، الكوسول المتعدد التخصصات.