

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

présenté en vue de l'obtention du diplôme

Masteren Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

**Etude Numérique Du Comportement Des Pièces Lors De
L'assemblage Par Impulsion Magnétique**

par :

Mr / Salah eddine Bouferroum

et

Mr / Ahmed Laouira

Travail proposé et dirigé par :

Mme / Ilhem Hafsaoui

Promotion 2020

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

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu le Tout-Puissant
de nous avoir donné*

*La force et le courage de mener à bien ce modeste travail,
également nous remercions infiniment nos parents, qui nous ont
encouragé et aidé à arriver à ce stade de notre formation. Nous
tenons à remercier tous ceux et celles qui ont contribué à finaliser
ce modeste travail.*

*Nos remerciements vont à Mme I. HAFSAOUI notre encadrant
pour nous avoir guidés*

*Pour la réalisation de ce projet. Nous remercions vivement les
étudiants Master-II Electromécanique pour leur aide morale durant
toute la période de préparation*

Et surtout Issam, Zyad, Ahmed et Mouad

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et
assisté durant nos études*

*Et nous exprimons toute notre gratitude à Dr. Boukhenef,
Dr. Maouche, Dr. Lourci et tous les enseignants qui nous ont formé.*

Salah eddine et Ahmed

DÉDICACES

À MES TRÈS CHERS PARENTS

*Quoi que je fasse que je dise, je ne saurais point vous remercier
comme il se doit, aucune*

*Dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et
ma considération. Votre*

*Affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence
à mes côtés à toujours*

*Été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que
ce travail traduit ma*

Gratitude et mon affection.

A mon très cher frère Islam Eddine et mes belles sœurs Malak

Fatima Zohra et Chayma

A mes très chers collègues et surtout

*Oussama, Ayoub, Mouad, Aala Eddine, Aala eddine Mohamed el
Salih yedroudje, Hani, Fouad, ayman*

Et zyad

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

Salah Eddine

DÉDICACES

À MES TRÈS CHERS PARENTS

*Quoi que je fasse que je dise, je ne saurais point vous remercier
comme il se doit, aucune*

*Dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et
ma considération. Votre*

*Affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence
à mes côtés à toujours*

*Été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que
ce travail traduit ma*

Gratitude et mon affection.

A mes belles sœurs Mariem

Marwa et Fatiha

A mes très chers collègues et surtout

*Ayoub, Mouad, Ahmed, Mohamed el Yasser, Houssam, Et
Chahereddine.*

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

Ahmed

Table des matières

Liste des Figures	xiii
Liste des Tableaux.....	xiv
Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur l'assemblage par impulsion magnétique	2
I.1.Introduction	2
I.2.Formage par impulsion magnétique	2
I.2.1.Définition	2
I.2.2.Principe du formage par impulsion magnétique.....	3
I.2.3.Techniques du formage par impulsion magnétique.....	3
I.2.3.1.Techniques de mise en forme par impulsion magnétique.....	3
I.2.3.2.Techniques de fléchissement par impulsion magnétique.....	4
I.2.3.3.Techniques d'assemblage par impulsion magnétique.....	5
I.3.Technologie de l'assemblage par impulsion magnétique.....	6
I.3.1.Cabine de contrôle	6
I.3.2.Le générateur	7
I.3.3.La station de travail	7
I.3.4.Le panneau opérateur.....	8
I.4.Avantages et inconvénients de l'assemblage par impulsion magnétique	8
I.4.1.Avantages de l'assemblage par impulsion magnétique	8
I.4.2.Inconvénients de l'assemblage par impulsion magnétique	9
I.5.Applications industrielles de l'assemblage par impulsion magnétique	9
I.5.1.L'industrie nucléaire	10
I.5.2.L'industrie d'automobile.....	10
I.5.3.L'industrie aérospatiale.....	11
I.5.4.Construction de câbles.....	12
I.5.5.Domaine de construction	12
I.5.6.Echangeurs de chaleur	13
I.5.7.Autres applications	13
I.6.Conclusion.....	15
Chapitre II Modélisation de l'assemblage par impulsion magnétique	16
II.1.Introduction.....	16

II.2. Equations de Maxwell et lois électromagnétiques	16
II.2.1. Equations de Maxwell	16
II.2.2. Lois de comportement	17
II.2.3. Conditions de passage	18
II.3. Phénomènes électromagnétiques	18
II.3.1. Equations de diffusion électromagnétique	18
II.3.2. Courant de décharge	19
II.3.3. Courants induits	19
II.3.4. Forces électromagnétiques	19
II.3.5. Effet de peau	20
II.3.6. Conditions aux limites	20
II.4. Phénomènes mécaniques	20
II.4.1. Equation d'équilibre	20
II.4.2. Relation déformation-déplacement	21
II.4.3. Relation contrainte-déformation	21
II.4.4. Conditions aux limites	22
II.5. Phénomènes thermiques	22
II.5.1. Equation thermique	22
II.5.2. Conditions aux limites	23
II.6. Couplage des différentes équations	23
II.6.1. Couplage fort	23
II.6.2. Termes de couplage	23
II.7. Logiciel de simulation	23
II.8. Conclusion	24
Chapitre III Applications et résultats numériques	26
III.1. Introduction	26
III.2. Assemblage de plaques plates par impulsion magnétique	26
III.2.1. Installation expérimentale	26
III.2.2. Analyse des grandeurs physiques	28
III.2.3. Analyse des caractéristiques de l'assemblage	31
III.2.4. Comportement des différents matériaux sous l'assemblage magnétique	33
III.2.5. Effet de l'entrefer entre l'inducteur et la plaque mobile	36
III.2.6. Effet du courant de décharge	38
III.3. Assemblage par impulsion magnétique d'un tube avec un noyau intérieur	43
III.3.1. Système modélisé	43
III.3.2. Courant de décharge	44

III.3.3.Résultats numériques	46
III.3.4.Effet du courant externe	49
III.4.Assemblage d'un tube avec un boulon interne	53
III.4.1.Propriétés géométriques et physiques de l'installation	53
III.4.2.Résultats numériques	55
III.4.3.Analyse de l'effet des paramètres géométriques	64
III.5.Conclusion	66
Chapitre IV Contribution à la modélisation 3D de l'assemblage magnétique	67
IV.1.Introduction	67
IV.2.Assemblage de plaques plates	67
IV.3.Assemblage des tubes par expansion	72
IV.4.Assemblage de tubes par compression	74
IV.5.Conclusion	77
Bibliographie	78
RESUME	82

Liste des Figures

Figure I.1: Illustration des différents constituants d'une installation de magnétoformage [17]	3
Figure I.2 : Techniques de mise en forme (a) : par compression (b) : par expansion (c) : par emboutissage [20].	4
Figure I.3 : Opérations de flambage (a) : droit (b) concave (c) convexe [22].	4
Figure I.4 : Opérations de pliage [22].	4
Figure I.5 : Couture par impulsion magnétique « Magnetic seaming » [22].	5
Figure I.6 : Perlage par impulsion magnétique « magnetic beading » [22].	5
Figure I.7 : Assemblage magnétique (a) : compression de tubes [23]. (b) : assemblage de plaques [24].	6
Figure I.8 : Machine d'impulsion magnétique [25].	6
Figure I.9: Equipement de stockage d'énergie [26]	7
Figure I.10: Bobines d'assemblage par impulsion magnétique [21].	7
Figure I.11: Barres de combustible nucléaire fabriquées par assemblage magnétique [31]	10
Figure I.12: Pièces assemblées par impulsion magnétique dans l'industrie d'automobile [21]	11
Figure I.13: tubes utilisés dans les avions assemblés par impulsion magnétique [31]	12
Figure I.14: Câbles construits par impulsion magnétique [33]	12
Figure I.15: Utilisation du soudage magnétique dans le domaine de construction [33]	13
Figure I.16: Utilisation de l'impulsion magnétique dans la construction des échangeurs [33]	13
Figure I.17: Pièces assemblées par impulsion magnétique [34]	14
Figure III.1: (a) : Système expérimental schématisé [50] (b) : Système modélisé	27
Figure III.2: Densité de courant de décharge	27
Figure III.3: Densité de courant induite à $t=10\mu s$	29
Figure III.4: Variation de la distribution des forces EM le long de la plaque mobile	29
Figure III.5: Assemblage des plaques à $t=10\mu s$	30
Figure III.6: Evolution temporelle de la déformation de la plaque.	30
Figure III.7: Répartition de la température le long de la plaque à $t=10\mu s$	32
Figure III.8: Profile de température dans la plaque mobile à différents points	32
Figure III.9: Evolution temporelle de la vitesse de la plaque mobile durant l'opération d'assemblage.	33
Figure III.10: Déformation de la plaque mobile selon la nature de son matériau.	35
Figure III.11: Répartitions de la température pour différents assemblages	35
Figure III.12: Déplacements de la plaque pour les différents entrefers	37
Figure III.13: Distribution de la température le long de la plaque mobile pour différents entrefers	37
Figure III.14: Formes d'assemblages obtenues avec différents courants de décharge	41

Figure III.15: Déplacements de la plaque mobile avec différents courants de décharge.....	42
Figure III.16: Température le long de la plaque mobile avec différents courants de décharge	43
Figure III.17: Installation d'assemblage de tubes [51]	43
Figure III.18: Géométrie modélisée correspondant à l'assemblage de tubes sur le noyau	44
Figure III.19: (a) : Densité de courant externe considérée dans la simulation (b) : Courant considéré dans la référence [51]	45
Figure III.20: Assemblage du tube au noyau à $t_{max}=10\mu s$	46
Figure III.21: Variations du déplacement du tube pendant l'assemblage magnétique	46
Figure III.22: Variations de la vitesse au niveau de certains points du tube.....	47
Figure III.23: Distribution de la température à travers le tube assemblé à $t=10\mu s$	48
Figure III.24: Variations temporelles de la température au milieu de l'épaisseur du tube	48
Figure III.25: Variations temporelles de la température au niveau du bord extérieur du tube	49
Figure III.26: Assemblage du tube au noyau interne à $t=5\mu s$ -Courant double-.....	50
Figure III.27: Déplacement du tube vers le noyau interne durant l'assemblage -Courant double-	51
Figure III.28: Distributions de la température du tube pendant l'assemblage	51
Figure III.29: Déplacement du tube vers le noyau avec différents courants de décharge.....	54
Figure III.30: Installation expérimentale [52].....	54
Figure III.31: Système géométrique [52].....	54
Figure III.32: Courant externe appliqué à l'inducteur	55
Figure III.33: Différents cas d'assemblages	62
Figure III.34: Vitesse d'impact pour certains cas d'assemblages.....	64
Figure III.35: Longueur d'assemblage en fonction de l'épaisseur du tube pour un offset de 1mm	65
Figure III.36: Longueur d'assemblage en fonction de l'épaisseur du tube – offset= 3mm	65
Figure IV.1: Système 3D d'assemblage de plaques.....	68
Figure IV.2: Densité de courant externe	68
Figure IV.3: Assemblage des plaques à $t=28,25\mu s$	69
Figure IV.4: La largeur d'assemblage des plaques	71
Figure IV.5: Le système d'assemblage des tubes par expansion 3D	73
Figure IV.6: Courant externe appliqué à la bobine	73
Figure IV.7: Assemblage de tubes par expansion.....	74
Figure IV.8: Géométrie de l'assemblage de tubes par compression.....	75
Figure IV.9: Assemblage de tubes par compression.....	77

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : paramètres physiques du système d'assemblage de plaques.....	26
Tableau III.2 : Propriétés des différents matériaux utilisés dans l'assemblage de plaques	34
Tableau III.3 : Caractéristiques des différents assemblages	35
Tableau III.4 : Effet de l'entrefer d sur la faisabilité de l'assemblage magnétique	37
Tableau III.5 : Effet du courant de décharge sur la durée de l'assemblage et sa longueur.....	51
Tableau III.6 : Différents cas de paramètres géométriques	55
Tableau IV.1 : Caractéristiques des assemblages à différents instants	68

Introduction Générale

Introduction Générale

La Technologie par Impulsion Magnétique, est un procédé innovant, permettant la mise en mouvement de pièces métalliques à haute vitesse, afin de les assembler, souder, former, plier ou découper.

Le procédé d'assemblage par impulsion magnétique, apparu au début des années 70, a été étudié par plusieurs groupes de recherche [1-9], en raison de ses nombreux avantages, en particulier l'augmentation de la formabilité et de la possibilité d'assembler des métaux différents à basse température.

Cette technique de plus en plus utilisée dans l'industrie, est un procédé qui permet l'assemblage rapide (en quelques micro secondes) de matériaux similaires ou dissimilaires à l'état solide. Ce procédé se base sur la génération des forces électromagnétiques (forces de Lorentz) dans une pièce conductrice, au moyen d'un inducteur parcouru par un courant variable et intense, de forme impulsionnelle [10]. Le processus d'assemblage magnétique a fait l'objet de plusieurs études expérimentales antérieures [11-14]. Cependant, la modélisation numérique révèle l'outil indispensable pour l'étude de tous les phénomènes mis en jeu.

Cette étude vise à présenter l'état de l'art de l'assemblage magnétique, à décrire ses principes physiques et ses procédures, y compris les équipements et les composants de l'installation pratique de cette technologie, dans le but d'étudier numériquement ce processus.

Ainsi, le but de ce travail est le développement d'un modèle numérique capable de calculer toutes les grandeurs physiques du système à savoir, les grandeurs électromagnétiques, mécaniques et thermiques, permettant ainsi la prévision du comportement des matériaux et des pièces, durant le processus étudié et l'étude de tous les phénomènes mis en jeu. Une analyse paramétrique a été menée, permettant d'étudier l'effet des caractéristiques géométriques et physiques sur le processus. Des exemples d'installations industrielles ont été simulés et étudiés.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les aspects théoriques et industriels du processus de l'assemblage par impulsion magnétique, ses avantages, ses inconvénients et certaines de ses utilisations industrielles.

Le deuxième chapitre présente les modèles mathématiques et numériques régissant les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques, mis en jeu lors de ce procédé d'assemblage par impulsion magnétique.

Le troisième chapitre présente la modélisation et la simulation de différentes applications théoriques et installations industrielles de l'assemblage par impulsion magnétique à l'aide de modèles numériques éléments finis, développés sous environnement COMSOL Multiphysics. Tous les résultats numériques seront analysés et interprétés.

Le quatrième chapitre présente une contribution à la modélisation tridimensionnelle de ce processus par la simulation de certaines applications en 3D.

Enfin, nous présentons la conclusion générale de ce travail et les éventuelles perspectives.

Chapitre I

Généralités sur l'assemblage par impulsion magnétique

Chapitre I Généralités sur l'assemblage par impulsion magnétique

I.1. Introduction

Le formage magnétique, appelé aussi formage par impulsion magnétique, est un procédé utilisé pour le formage de pièces métalliques conductrices [10]. Il se base sur une décharge brève et intense d'un courant impulsionnel, traversant une bobine placée en face de la pièce à former. La variation du champ magnétique créé par la bobine induit des courants dans la pièce. Le couplage entre ce champ et ce courant induit génère des forces importantes qui permettent la mise en forme de la pièce.

La mise au point des procédés de formage par impulsion magnétique est souvent complexe à réaliser, en particulier du fait des nombreux couplages multi physiques impliqués dans le procédé. Cela, nécessite de s'appuyer sur une démarche de modélisation numérique requérant une description précise du comportement des matériaux mis en jeu.

Un des principaux enjeux est alors de déterminer au mieux le comportement des matériaux lors des sollicitations dynamiques.

En effet, la durée d'une opération de magnétoformage est de l'ordre d'une centaine de microsecondes, les vitesses de déformation associées pouvant aller de 100 à 10 000 m.s⁻¹. Le comportement mécanique peut alors être modifié et s'éloigner du comportement observé sous sollicitations quasi-statiques [15] [16].

Pour des modèles améliorés, l'analyse du comportement thermique des pièces formées, est fortement désirable.

Parmi les différentes applications du formage magnétique, l'assemblage par impulsion magnétique est une technique, de plus en plus utilisée dans l'industrie, permettant d'assembler des pièces plates ou tubulaires de mêmes matériaux (assemblage similaire) ou de matériaux différents (assemblage dissimilaire).

I.2. Formage par impulsion magnétique

I.2.1. Définition

Le fromage électromagnétique (FEM) ou magnétoformage est un procédé de mise en forme des métaux à l'aide d'efforts électromagnétiques à grande vitesse de déformation. La déformation se fait en déchargeant de fort courant pendant des instants de temps très courts (de l'ordre des millisecondes) à travers une bobine située au voisinage de la pièce à former [17].

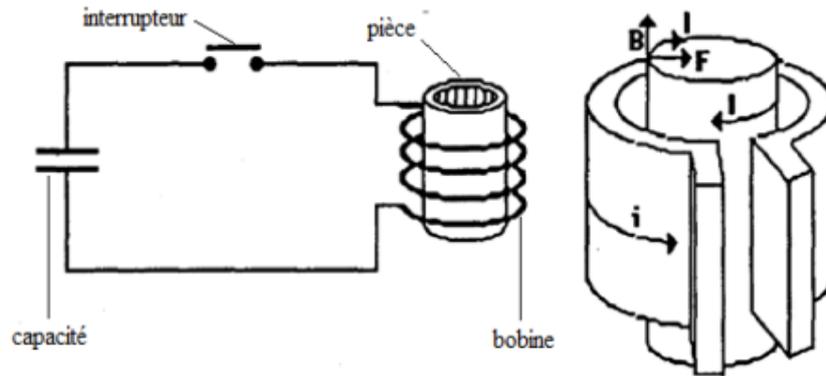


Figure I.1: Illustration des différents constituants d'une installation de magnétoformage [17]

I.2.2. Principe du formage par impulsion magnétique

En présence d'un champ magnétique variable au cours du temps, tout matériau conducteur de l'électricité, placé dans ce champ est l'objet d'un courant induit. La présence du champ et du courant induit dans le matériau crée des forces magnétiques intenses (forces de Lorentz) permettant la déformation des pièces mises en jeu [18], [19].

Différentes formes peuvent être obtenues selon la forme de l'inducteur (bobine) et celle de la pièce utilisée (work-piece).

I.2.3. Techniques du formage par impulsion magnétique

Différentes techniques de formage par impulsion magnétique, sont obtenues par différentes formes d'inducteurs et pièces à former.

I.2.3.1. Techniques de mise en forme par impulsion magnétique

La technique de formage magnétique proprement dit, présente trois opérations essentielles : la compression, l'expansion et l'emboutissage [20].

- Dans la configuration de la compression, la pièce tubulaire à former est introduite à l'intérieur d'une bobine coaxiale, parcourue par le courant de décharge. Ce tube conducteur, siège d'un courant induit, subit une force radiale intense, dépassant sa limite élastique et provoquant sa compression (figure I.2.a).

- La mise en forme par expansion est assurée par les efforts électromagnétiques créés par les courants induits dans le tube disposé à l'extérieur de la bobine coaxiale (figure I.2.b). L'utilisation d'une matrice, est parfois désirable pour donner une forme spécifique.

- Le dispositif illustré en figure I.2.c, permet de réaliser une opération de placage ou d'emboutissage, la plaque métallique est repoussée violemment loin de la bobine, pour se former librement ou se heurter à une matrice, lui donnant une forme désirée.

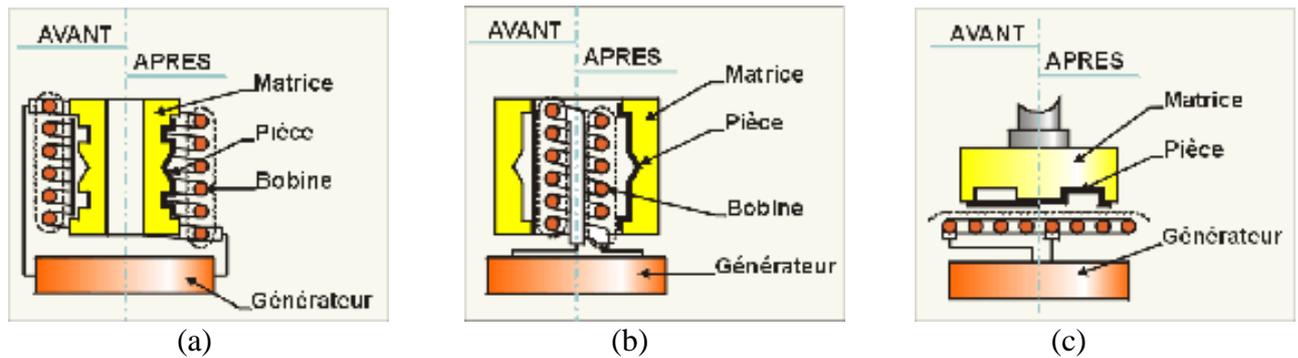


Figure I.2 : Techniques de mise en forme (a) : par compression (b) : par expansion (c) : par emboutissage [20]

I.2.3.2. Techniques de fléchissement par impulsion magnétique

C'est un procédé de formage magnétique industriel. Il est utilisé surtout pour la production des châssis et des fermetures automobiles, et possède donc un effet critique sur la qualité des assemblages finaux. Nous distinguons plusieurs opérations de fléchissement, parmi lesquelles : le flambage, le pliage, la couture et le perlage (figures I.3-6) [21][22].

- Le flambage : Il se caractérise par le fait que le bord de la pièce est fléchi avec un angle de 90 degrés.

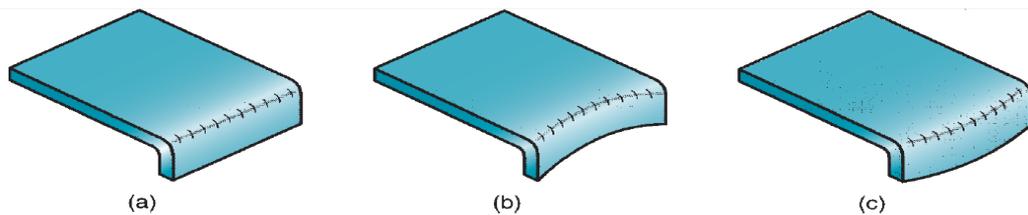


Figure I.3 : Opérations de flambage(a) : droit (b) concave (c) convexe [22]

- Le pliage : Cette opération permet de plier le bord d'une plaque sur lui-même ou sur une tôle.



Figure I.4 : Opérations de pliage [22]

- La couture « seaming » : Une autre technique de fléchissement magnétique de tôles métalliques, de plus en plus utilisée dans l'industrie de véhicules, est l'opération de couture, dans laquelle deux bords de tôle sont réunis.

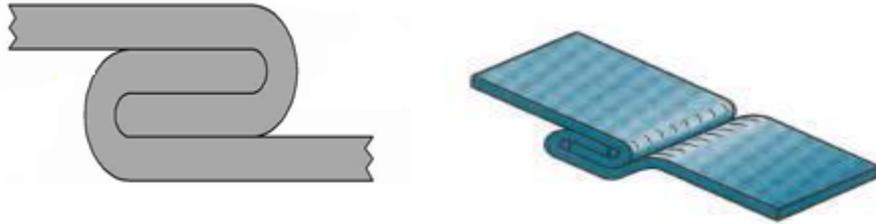


Figure I.5 : Couture par impulsion magnétique « magnetic seaming »[22]

- Le perlage « beading » : Il forme les bords de la pièce en un rouleau ou une boucle.



Figure I.6 : Perlage par impulsion magnétique « magnetic beading » [22]

I.2.3.3. Techniques d'assemblage par impulsion magnétique

Le formage magnétique est avant tout un procédé d'assemblage de pièces, tubulaire ou autre formes, sur un support résistant mécaniquement [23].

Le phénomène s'apparente au soudage par explosion. Il permet de souder des matériaux de même nature, similaires ou de natures différentes, dissimilaires.

L'assemblage peut être effectué par expansion ou compression de pièces tubulaires, mais il peut s'appliquer sur d'autres formes carrées, rectangulaires, etc. et aussi sur des tôles (figure I.7).

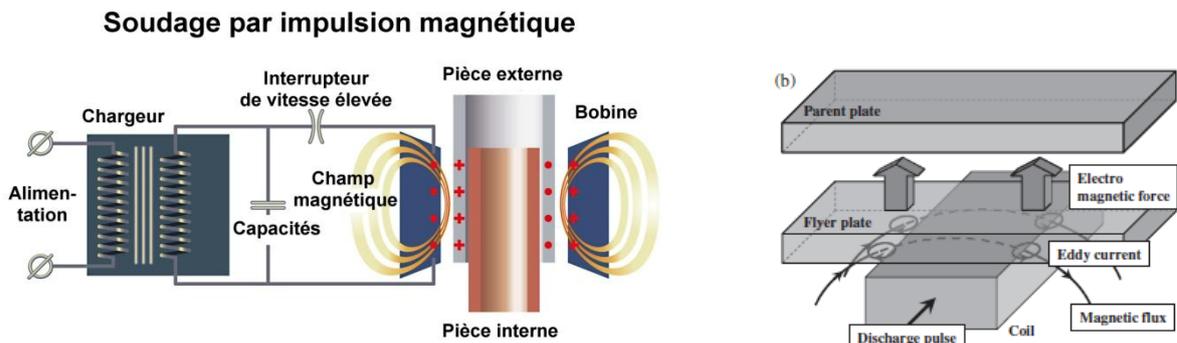


Figure I.7 : Assemblage magnétique (a) : compression de tubes [23]. (b) : assemblage de plaques [24]

I.3. Technologie de l'assemblage par impulsion magnétique

L'installation d'impulsion magnétique utilisée pour toutes les applications de formage magnétique est composée de trois grandes parties reliées entre elles par un panneau opérateur. Il s'agit de la cabine de contrôle, du générateur d'impulsion et de la station de travail (Figure 1.8) [25].

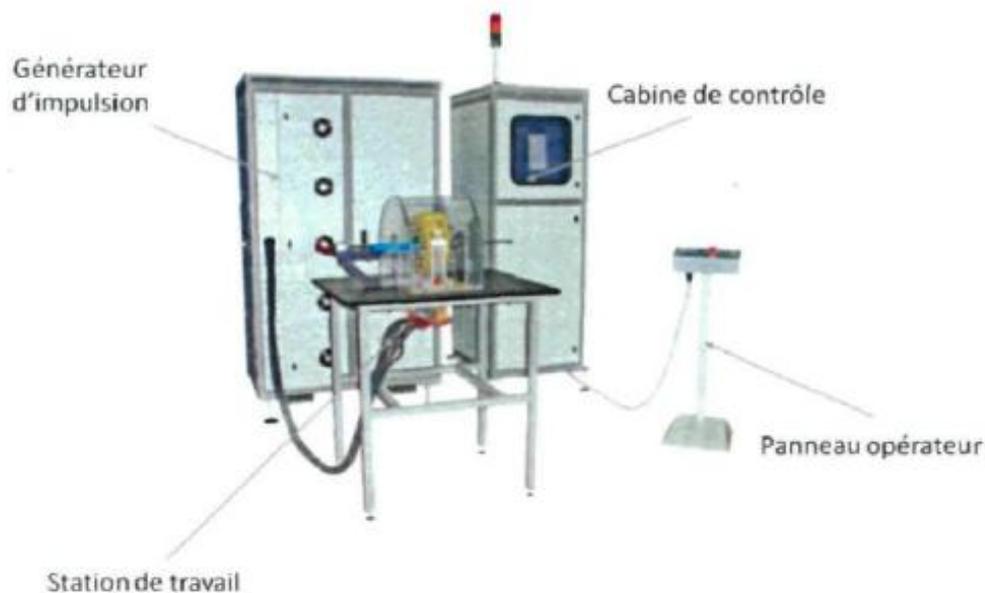


Figure I.8 : Machine d'impulsion magnétique [25]

I.3.1. Cabine de contrôle

C'est la première partie de la machine, où se trouvent les fusibles et interrupteurs pour couper le courant. S'y trouvent aussi, les transformateurs de courant, le système d'allumage ainsi que le circuit de contrôle.

I.3.2. Le générateur

Le générateur d'impulsion est capable de délivrer des impulsions électriques de plusieurs centaines de kilo-ampères, sous des tensions de plusieurs kilovolts et d'une durée de quelques centaines de microsecondes, avec des cadences de production industrielles. Il comporte les condensateurs qui stockent le courant de décharge (Figure I.9) [26-28].



Figure I.9: Equipement de stockage d'énergie [26]

I.3.3. La station de travail

La station de travail comporte l'inducteur et les pièces à former avec quelques autres éléments.

La bobine de formage joue un rôle primordial en formage électromagnétique [29]. Elle transforme l'impulsion électrique de décharge des condensateurs en champ magnétique intense et doit supporter sans se déformer la pression magnétique qui permet la mise en forme des Pièces [30].

Les bobines sont spécifiques à l'application, il existe les bobines d'assemblage à concentrateur cylindrique, les bobines d'assemblage à concentrateur plat, les bobines d'assemblage par compression et les bobines d'assemblage par expansion (figure I.10).

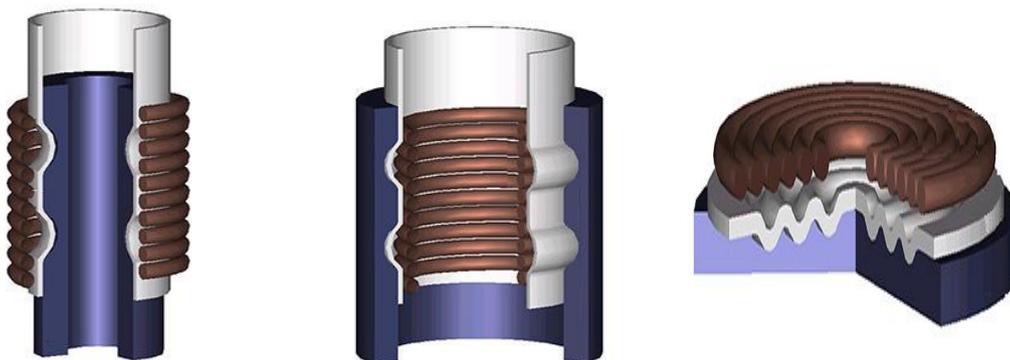


Figure I.10: Bobines d'assemblage par impulsion magnétique [21]

I.3.4. Le panneau opérateur

Le panneau opérateur permet à l'utilisateur de choisir la tension de charge des capacités, pour créer l'impulsion électrique dans la bobine de formage, permettant d'appliquer des forces intenses sur les pièces à former [25].

I.4. Avantages et inconvénients de l'assemblage par impulsion magnétique

L'assemblage magnétique est une technique qui présente des avantages et des inconvénients. Néanmoins, il a été vérifié qu'il s'agit d'un processus très efficace [31].

I.4.1. Avantages de l'assemblage par impulsion magnétique

Le principal avantage de ce procédé est la contrôlabilité et la répétabilité, mais il existe de nombreux autres avantages [31-32] :

- Possibilité d'assembler des matériaux différents, tout en conservant leurs propriétés mécaniques et chimiques.
- Il s'agit d'un processus à froid car la température ne varie pas de manière significative pendant ce processus, principalement en raison du court temps de décharge d'énergie.
- C'est un processus propre. Au moment de l'impact entre les deux matériaux, la pression magnétique enlèvera toute saleté de la surface de contact, et une liaison métallurgique est réalisée entre les surfaces propres. Ainsi, il n'est pas nécessaire de procéder à un nettoyage de surface avant et après l'opération.
- Meilleure résistance à la corrosion au niveau de la zone assemblée.
- Il offre l'avantage d'un rapport résistance-poids plus élevé sans aucune zone affectée par la chaleur.
- La zone d'assemblage est plus forte, donc la défaillance (rupture) se produit toujours en dehors de la zone soudée.
- Processus écologique. Par rapport à d'autres procédés de soudage, il n'émet pas de gaz nocifs dans l'atmosphère, ou de rayonnement. De plus, en raison de l'absence de frottements, aucun lubrifiant n'est nécessaire. Pour cela, il est appelé « processus vert ».
- Du point de vue économique, tout coût de reprise sera éliminé, réduisant ainsi, le temps de cycle et augmentant la capacité du processus.
- Aucune finition ou nettoyage n'est requis après le processus d'assemblage magnétique.
- La technologie d'assemblage par impulsion magnétique a amélioré la qualité et la productivité tout en réduisant les coûts par pièce, en introduisant des conceptions de production révolutionnaires, ce qui n'était pas possible jusqu'à aujourd'hui.
- Cette technologie est, particulièrement adaptée à la production en grandes séries et aux systèmes automatisés. Principalement, en raison de son faible entretien et de sa rapidité.
- L'équipement peut être utilisé par des opérateurs non qualifiés.

- Le procédé par impulsion magnétique est principalement utilisé pour assembler des métaux, mais son applicabilité a été bien vérifiée lors du compactage de la poudre.

Cela devient une autre manière de produire des pièces avec un certain niveau de complexité.

I.4.2. Inconvénients de l'assemblage par impulsion magnétique

Malgré les nombreux avantages, il existe des limitations ou des inconvénients de l'assemblage magnétique [31-32].

- Il existe quelques cas d'oxydation sur la zone assemblée. Pour cela, il est nécessaire de vérifier, de temps en temps, la pénétration de la soudure pour éviter les espaces qui induiront la corrosion.
- La pièce qui va subir la déformation plastique, doit avoir une bonne conductivité électrique. Sinon, une énergie plus élevée sera nécessaire et le coût du processus peut être comparativement plus élevé.
- De nos jours, la bobine inductrice est toujours un matériau très coûteux et doit être remplacé périodiquement, lors du processus d'assemblage magnétique.
- En raison de la vitesse et de la pression d'impact, le matériau intérieur doit avoir une résistance mécanique suffisante pour résister à l'impact et ne pas se déformer avec le matériau extérieur.
- En raison de l'intensité élevée de la tension et du courant de décharge, le niveau de sécurité doit être maintenu à un niveau élevé et des précautions de sécurité spéciales doivent être mises en œuvre avant l'industrialisation de ce processus d'assemblage magnétique.

I.5. Applications industrielles de l'assemblage par impulsion magnétique

De nos jours, les entreprises tentent d'acquérir, elles-mêmes, de nouvelles actions du marché en élargissant leur gamme de produits. C'est une compétition internationale et une tendance émergente vers l'individualisation des exigences des clients.

Le résultat est une pression pour réduire les coûts, augmenter l'efficacité des processus existants et exploiter des technologies récentes.

L'assemblage magnétique est l'un des processus qui a été négligé, et depuis les années 70 a été étudié et développé. Au début, il était très coûteux et n'était utilisé que dans les applications nucléaires.

Aujourd'hui, il est possible de voir l'utilité de ce procédé dans différentes industries, en particulier, l'industrie d'automobile [31].

I.5.1. L'industrie nucléaire

L'industrie nucléaire a été responsable de la découverte et des premiers développements du soudage magnétique [31]. Ces pièces sont signalées comme les premiers composants produits à l'aide de la technique de l'assemblage magnétique.



Figure I.11: Barres de combustible nucléaire fabriquées par assemblage magnétique [31]

I.5.2. L'industrie d'automobile

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

La technologie du formage par impulsion magnétique, en particulier la technique d'assemblage, est la réponse aux grands enjeux de la fabrication. Capables de garantir la réduction du poids et de la taille de certains composants, des frais de production, du taux de défaillance des pièces, tout en offrant une amélioration de la durée de vie.

Ces systèmes se révèlent fortement attrayants pour l'industrie automobile.

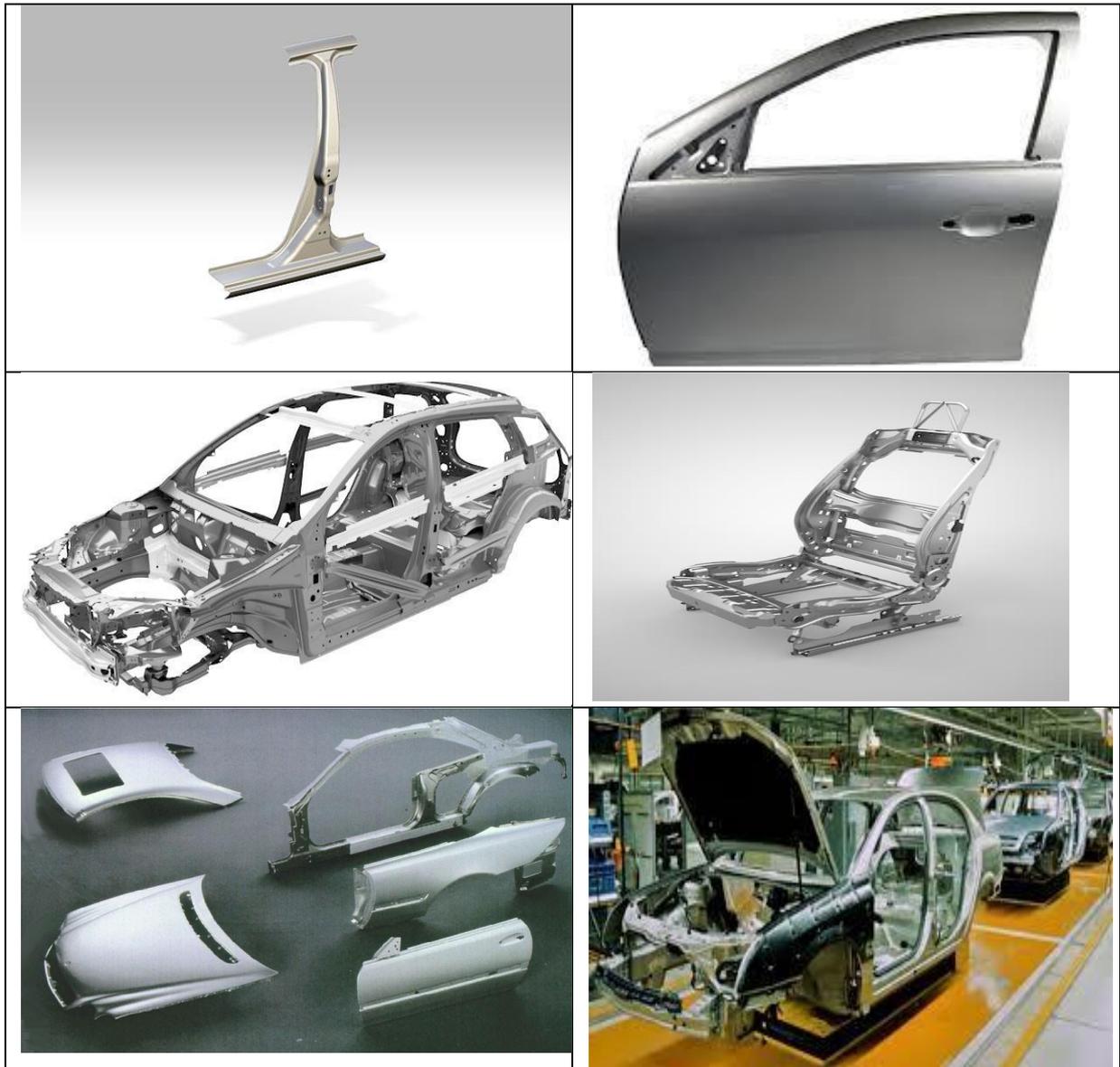


Figure I.12: Pièces assemblées par impulsion magnétique dans l'industrie d'automobile [21]

I.5.3. L'industrie aérospatiale

L'assemblage par impulsions magnétiques a gagné sa place dans cette industrie, par le fait que, lors de l'utilisation de technologies traditionnelles d'assemblage de pièces creuses, leur qualité ne correspond pas aux exigences accrues de la production.

En effet, la navigation aérienne est un art qui exige beaucoup de la part des concepteurs. Désormais, grâce à la technologie de soudage par impulsion magnétique, il est possible de simplifier toutes les étapes de l'ingénierie spatiale.



Figure I.13: Tubes utilisés dans les avions assemblés par impulsion magnétique [31]

I.5.4. Construction de câbles

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

Le sertissage magnétique produit aussi, des assemblages à plus grande résistance mécanique à surfaces de contact ultra-conductrices et permet d'utiliser de nouveaux matériaux comme le verre, les composites et les fibres optiques [33].



Figure I.14: Câbles construits par impulsion magnétique [33]

I.5.5. Domaine de construction

Les assemblages ont toujours été le maillon faible de la chaîne de construction. Mais de nos jours les règles ont changé. Les joints sont devenus la zone la plus solide et mieux encore, il est possible dans certains cas, de les éliminer complètement, car la forme est produite à partir d'un seul élément au lieu d'avoir à en joindre plusieurs.

Avec la technologie utilisant l'impulsion magnétique, on peut concevoir des composants à base de métaux dissemblables où la résistance mécanique de l'assemblage est supérieure à celle des métaux d'origine [33].



Figure I.15: Utilisation de l'assemblage magnétique dans le domaine de construction [33]

I.5.6. Echangeurs de chaleur

Dans le domaine des échangeurs thermiques, les enjeux sont nombreux. Les plus importants sont : nécessité de matériaux plus fins et légers, des composants de très haute qualité, ayant une meilleure efficacité. Or les technologies et les matériaux disponibles dans le commerce ne semblent pas pouvoir y apporter de solutions.

Cependant, avec l'impulsion magnétique, on peut dépasser les contraintes actuelles et commencer à former les composants, souder des matériaux hybrides et créer des assemblages qui résistent aux fortes pressions [33].

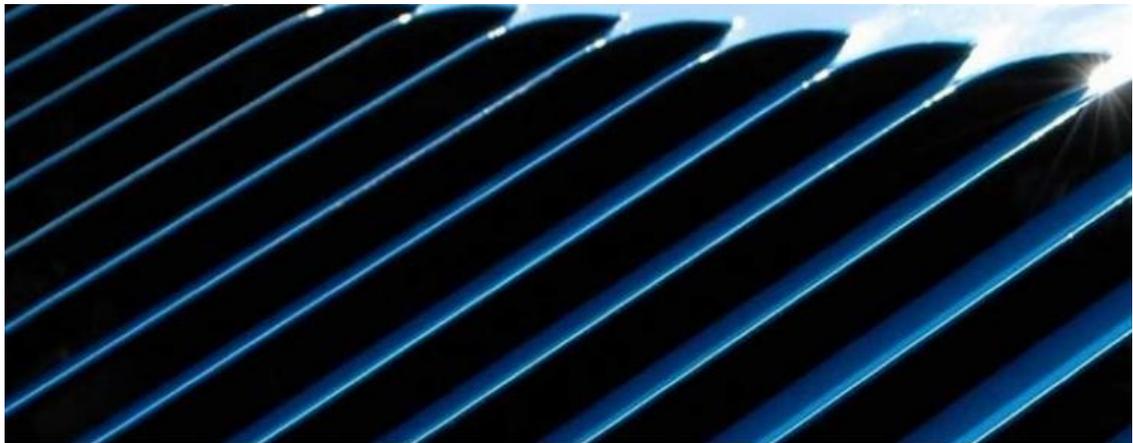


Figure I.16: Utilisation de l'impulsion magnétique dans la construction des échangeurs [33]

I.5.7. Autres applications

Le fait de pouvoir créer des structures extrêmement résistantes et légères, dans les plus menus détails et à haute précision, tout en réduisant les frais de production est un argument de poids qui s'applique pratiquement à toute les chaînes de fabrication [33].

Plusieurs autres domaines, où la technologie d'assemblage magnétique peut stimuler la créativité des concepteurs et des ingénieurs :

- Couplage supraconducteurs-conducteurs normaux,

- Appareils sous pression,
- Groupe arbre de moteur-pompe,
- Télécommunications – raccords sertis pour câbles en fibre optique
- Construction navale,
- Tuyaux profilés et jaugés,
- Boîtiers de téléphones cellulaires,
- Soufflets – Tubulures médicales, Tubulures de refoulement – Puits de pétrole,
- Turbines à vapeur,
- Emballage,
- Energie.



Figure I.17: Pièces assemblées par impulsion magnétique [34]

I.6. Conclusion

Ce chapitre a possé l'état de l'art du formage par impulsion magnétique, en l'occurrence l'assemblage magnétique. Cette technique suscite un grand intérêt dans quasiment tous les domaines, avec un bon rendement, une production rapide et présence de larges applications. Grace à ses nombreux avantages, ce procédé permet d'accomplir certaines applications qui ont été auparavant impossibles ou beaucoup trop couteuses avec les méthodes classiques.

Néanmoins, les limitations de cette technologie, poussent les concepteurs et les chercheurs au développement de modèles numériques performants capables, d'étudier les phénomènes physiques mis en jeu durant le processus, dans le but de prévoir le comportement des matériaux assemblés par cette technique et d'étudier leur déformation, leur soudabilité et les propriétés de l'impact entre les pièces assemblées ou soudées.

Le prochain chapitre est consacré à la formulation mathématique du processus d'assemblage magnétique. Il fait la présentation des différentes équations régissant les phénomènes mis en jeu lors de ce procédé et du calcul des différentes grandeurs physiques analysant le comportement magnétique ,mécanique et thermique des matériaux et pièces utilisées.

Chapitre II

Modélisation de l'assemblage par impulsion magnétique

Chapitre II Modélisation de l'assemblage par impulsion magnétique

II.1.Introduction

L'assemblage par impulsion magnétique est une technique de formage magnétique, qui se base sur la déformation plastique de pièces métalliques. C'est un processus multi-physique, qui regroupe aussi bien les phénomènes électromagnétiques, que les phénomènes mécaniques et thermiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les équations mathématiques régissant les différents phénomènes mis en jeu. Ensuite, nous procédons à l'analyse des modèles numériques couplés, nécessaires pour la simulation de plusieurs installations industrielles de l'assemblage magnétique, en utilisant le logiciel COMSOL, qui est brièvement présenté.

II.2.Equations de Maxwell et lois électromagnétiques

II.2.1.Equations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques sont décrits de façon assez complète par les célèbres équations de Maxwell, auxquelles, il faut ajouter quelques équations de comportement des milieux. Ces équations permettent non seulement de décrire les champs électriques et magnétiques ainsi que leur interaction mais aussi de donner un cadre mathématique à tous les phénomènes électromagnétiques [35].

Elles se déclinent sous le système de quatre équations locales ci-après:

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

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

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

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

Où :

ρ : Densité volumique de charge électrique. [C/m³]

\vec{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

\vec{B} : La densité de flux ou induction magnétique [T].

\vec{J} : Densité de courant de conduction. [A/m³].

\vec{D} : Induction électrique. [A.S/ m³].

II.2.2. Lois de comportement

En plus des équations de Maxwell, la modélisation du comportement électromagnétique des matériaux, nécessite l'utilisation des lois de comportement. Elles définissent la réponse du milieu face à une sollicitation (électrique, magnétique, mécanique, thermique ...) [21] [36] [37] :

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

Où :

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

Avec :

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

\vec{J}_c : Densité du courant de conduction ;

\vec{J}_s : Densité de courant de source ;

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

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

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

Avec :

σ : conductivité électrique [S/m].

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

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

Avec :

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H/m].

μ_r : Perméabilité relative.

Si le matériau est ferromagnétique, le modèle devient non linéaire :

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

Avec :

\vec{B}_r : Induction rémanence [T].

μ_a : Perméabilité magnétique de l'aimant [H/m].

Pour le comportement électrique, ce dernier est traduit par la relation électrique, de la forme :

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{II.11})$$

Avec :

ε : permittivité électrique [F/m].

ε_0 : permittivité de vide.

ε_r : permittivité de relative.

II.2.3. Conditions de passage

Le passage entre deux milieux, de propriétés physiques différentes, doit satisfaire les conditions suivantes [36] [38] [39] :

- La continuité de la composante normale de l'induction magnétique :

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

- La continuité de la composante tangentielle du champ électrique:

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

- La discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.14})$$

- La discontinuité de la composante tangentielle de champ magnétique due aux courants surfaciques \vec{J}_s :

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.15})$$

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

II.3. Phénomènes électromagnétiques

II.3.1. Equations de diffusion électromagnétique

Les phénomènes électromagnétiques, mis en jeu dans le processus d'assemblage magnétique, sont régis par le modèle magnétodynamique qui s'applique aux dispositifs électrotechniques, dont les sources de courant ou de tension varient en fonction du temps. Les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants induits.

En utilisant la formulation en potentiels et en considérant les matériaux isotropes, le système d'équations électromagnétiques à utiliser est le suivant [40] [41] :

Le système devient :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{rot}(\mu^{-1} \text{rot} \vec{A}) - \sigma \vec{v}(\text{rot} \vec{A}) = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II.16})$$

II.3.2. Courant de décharge

Le courant de décharge, qui traverse l'inducteur est donné par la relation ci-dessous, solution de l'équation différentielle régissant le circuit électrique de décharge, comportant le banc de capacités [17] :

$$I(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\xi \omega_0 t) \sin 2\pi f t \quad (\text{II.17})$$

Avec :

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

$$\omega_0 : \text{Pulsation propre [rad/s]} : \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

V_0 : Tension du générateur [V].

C : Capacité électrique du circuit de décharge [F].

L : inductance du circuit de décharge [H].

II.3.3. Courants induits

La densité des courants induits est calculée par l'équation suivante [42-43]:

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

II.3.4. Forces électromagnétiques

La méthode la plus utilisée pour calculer les forces de Lorentz dans un dispositif avec courants induits sont calculées en utilisant l'expression suivante [42] [44] :

$$\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

\vec{F} : Densité de forces. [N/ m³].

\vec{j} : Densité de courant induite. [A/m²].

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

II.3.5.Effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire ou encore effet Kelvin se retrouve dans tous les conducteurs traversés par un courant alternatif. Il se traduit par la décroissance exponentielle de la densité de courant avec l'épaisseur du conducteur. Cet effet dépend, principalement de la fréquence des courants. En fait, l'épaisseur de peau correspond à une atténuation de la densité de courant en surface [35].

L'épaisseur de peau, appelée aussi profondeur de pénétration, est calculée ainsi :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

ω : La pulsation : $\omega = 2\pi f$

μ : Perméabilité magnétique.

σ : Conductivité électrique.

II.3.6.Conditions aux limites

Pour tous les problèmes électromagnétiques, régis par le modèle magnétodynamique, les conditions aux limites nécessaires sont de type Dirichlet :

- Isolation magnétique : $\vec{A} = 0$ Au niveau de la boîte infinie.

II.4.Phénomènes mécaniques

II.4.1.Equation d'équilibre

L'équation fondamentale régissant la déformation de tout matériau isotrope est donnée par l'équation d'équilibre appelée, la seconde loi de Newton [40] [17] [41] :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{\gamma} \quad (\text{II.21})$$

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div}[\sigma] = \vec{F} \quad (\text{II.22})$$

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{\gamma}$$

Avec :

ρ : La densité volumique du matériau [Kg/m^3].

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

σ : Le tenseur des contraintes [N/m].

\vec{F} : Le vecteur de charges [N/m^3].

II.4.2.Relation déformation-déplacement

En tout point, la déformation est complètement définie par les composantes du déplacement (\mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w}) et leurs dérivées. Dans le cas général, elle est formée par 3 composantes [21] [45] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (\text{II.23})$$

Avec :

ε_{el} : La déformation élastique.

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

α : Le coefficient d'expansion thermique.

ε_p : La déformation plastique.

T : Température.

T_{ref} : Température ambiante.

Dans notre modélisation, la déformation thermique n'est pas considérée, du fait que les variations de température durant le processus de FEM ne sont pas très excessives [21].

Les composantes de la déformation sont :

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

II.4.3.Relation contrainte-déformation

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

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

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

Pour le comportement mécanique des matériaux non linéaires, nous avons utilisé le cas élasto-plastique, défini par la relation [40] [17] :

$$\sigma = D \varepsilon_{el} + \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_{th} - \varepsilon_0) \quad (II.25)$$

Avec :

E : Le module de Young [Pa].

ν : Le coefficient de poisson.

σ_0 : Contrainte initiale [Pa].

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

II.4.4. Conditions aux limites

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

- Déplacement nul sur les frontières encastées de la pièce : $\vec{\mu} = 0$
- Les frontières de la pièce qui peuvent se déformer, sont libres.

II.5. Phénomènes thermiques

II.5.1. 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, du à l'effet joule, créé par la circulation des courants induits [46][47][48].

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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-K \overrightarrow{\text{grad}} T) = Q + q_s T \quad (II.27)$$

Avec :

T : La température [K]

K: Conductivité thermique [W/m. K].

ρ : Densité volumique du matériau [kg/m³].

C_p : Capacité calorifique [J/kg. K].

Q : source de chaleur, représentée par la chaleur dégagée par effet joule [W].

q_s : coefficient d'absorption ($q_s = 0$). (pas d'absorption).

II.5.2. Conditions aux limites

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

- Flux convectif sur les frontières de la pièce, en contact avec l'air environnant.

II.6. Couplage des différentes équations

II.6.1. Couplage fort

Le couplage fort est celui qui fournit les résultats les plus proches de la réalité et nécessite la résolution du système globale des équations (équations électromagnétiques, mécanique et thermique) à chaque pas de temps [21].

L'inconvénient de ce type de couplage est la manipulation de larges matrices et par conséquent la nécessité de plus d'espace mémoire et plus de temps de calcul en temporelle.

Pour tenir compte de la déformation de la géométrie, cette dernière est remaillée à chaque pas de temps.

C'est le type de couplage qui a été utilisé dans ce travail.

II.6.2. Termes du couplage

Les termes du couplage entre les différentes équations sont représentés par :

- Les forces électromagnétiques (II.20), qui représentent les charges appliquées sur les pièces en déformation : second terme de l'équation mécanique (II.22).
- Source de chaleur, pour l'équation thermique, évacuée par effet de Joule :

$$Q = \frac{1}{2\sigma} J^2 \quad (\text{II.28})$$

II.7. Logiciel de simulation

C'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en sciences physiques et en ingénierie, et tout particulièrement, les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques 2D et 3D.

COMSOL multi-physique autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) [49].

L'application de ce logiciel, pour la simulation des systèmes d'assemblage par impulsion magnétique, est basée sur les étapes suivantes :

- Choix du mode de résolution 2D, 2D axisymétrique, 3D.
- Construction du domaine d'étude.

- Choix des problèmes étudiés : Introduction des équations à résoudre (équation électromagnétique, équation mécanique et équation thermique)
- Introduction des propriétés physiques liées à chaque milieu et à chaque problème.
- Introduction des conditions aux limites pour chaque problème considéré.
- Choix du régime de résolution stationnaire ou temporel et la méthode utilisée.
- Choix du maillage du domaine d'étude et contrôle de sa qualité.
- Résolution du système couplé
- Post traitement et exploitation des résultats du modèle couplé.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les formulations mathématiques et numériques, correspondantes aux différents phénomènes, mis en jeu lors du processus d'assemblage magnétique: phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques. Les modèles numériques, utilisent le couplage fort, permettant la résolution simultanée des différentes équations, assurée par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

Tous les résultats numériques des certaines applications pratiques et industrielles seront présentés, analysés et interprétés dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Applications et résultats numériques

Chapitre III Applications et résultats numériques

III.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est la présentation des différentes applications numériques et les résultats obtenus pour différents dispositifs d'assemblage par impulsion magnétique, permettant l'étude des phénomènes physiques mis en jeu et l'analyse de toutes les grandeurs électriques, mécaniques et thermiques.

Les résultats numériques obtenus, en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics® 3.5, sont présentés et interprétés pour différentes installations industrielles simulées. Dans certains cas, des études paramétriques sont menées pour analyser l'effet de certains paramètres géométriques et physiques.

III.2.Assemblage de plaques plates par impulsion magnétique

III.2.1.Installation expérimentale

La première application étudiée est celle qui concerne l'assemblage de plaques planes parallèles, dont l'une est mobile pouvant se déformer pour s'assembler avec l'autre plaque fixe. Le système simulé dans cette application est celui du dispositif expérimental [50], dont les paramètres physiques sont regroupés dans le tableau III.1.

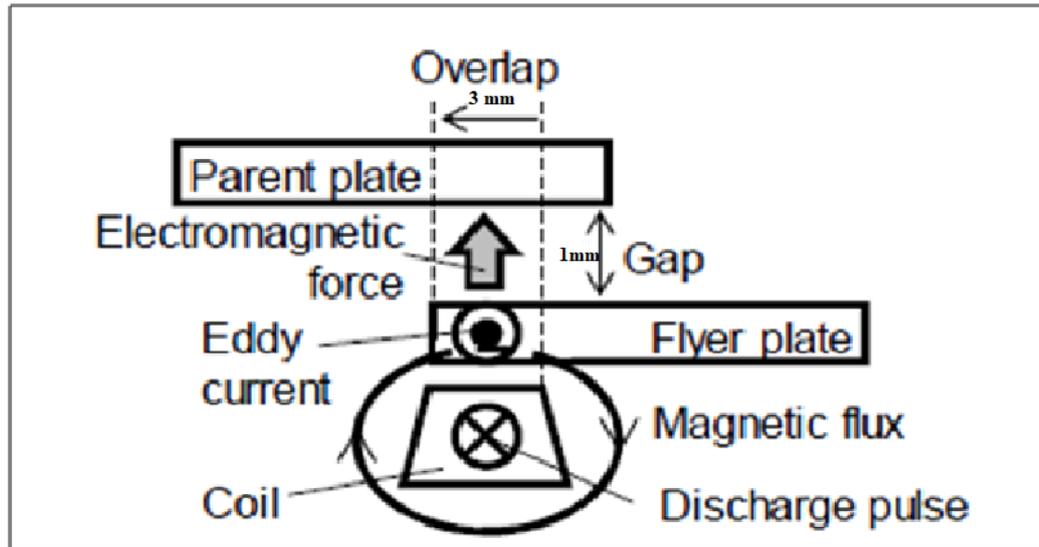
Il comporte deux plaques plates de 12mm de longueur et 0,5mm d'épaisseur, distantes de 1mm, situées au-dessus d'un inducteur en cuivre. La distance de chevauchement (overlap) entre la plaque mobile et l'inducteur est de 3mm, l'entrefer ou gap entre les deux est de 1mm. (Figure III-1).

Le courant de décharge du banc de capacité utilisé est de forme sinusoïdale amortie représenté sur la figure (Figure III.2).

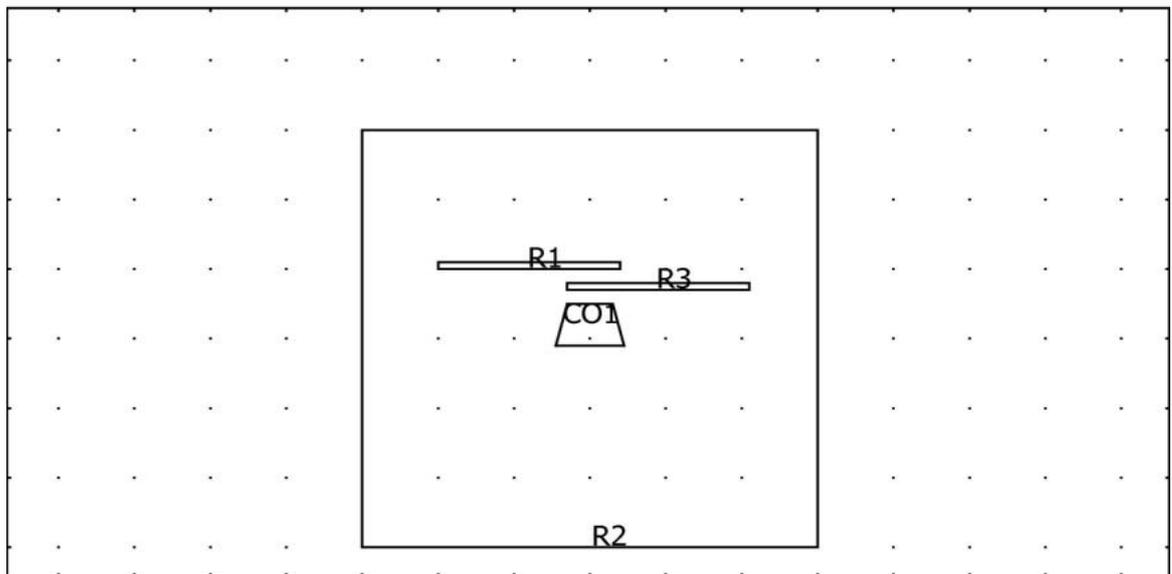
$$J_z = 4.35 e^{11} * \exp(-3e^4 * t) * \sin(1.45e^5 * t) \quad (\text{III.1})$$

Tableau III.1 : Paramètres physiques du système d'assemblage de plaques planes

	Plaques en Aluminium	Inducteur en Cuivre
Densité de masse volumique [kg/m³]	2700	8700
Conductivité électrique [S/m]	3.774 e ⁷	5.998 e ⁷
Module de young [Pa]	70e ⁹	110e9
Coefficient de poisson	0.33	0.35
Conductivité thermique [W/(m.K)]	160	400
Capacité calorifique [J/(kg.K)]	900	385



(a)



(b)

Figure III.1: (a) : Système expérimental schématisé [53] ,(b) : Système modélisé

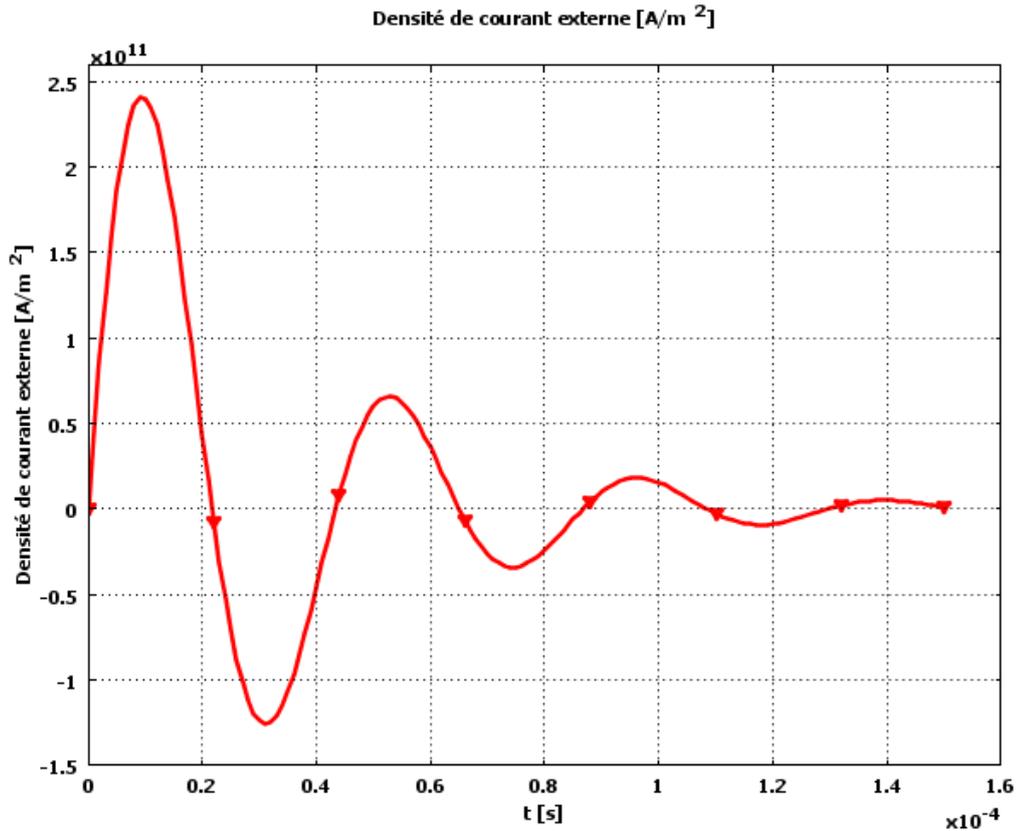


Figure III.2: Densité de courant de décharge

III.2.2. Analyse des grandeurs physiques

D'après les résultats numériques du modèle électromagnétique, les courants induits au niveau de la plaque mobile, à l'instant finale $t=10\mu\text{s}$, sont théoriquement prévisibles, ils sont opposés au courant d'excitation, selon la loi de Lenz, et accentués sur les parties face à l'inducteur (Figure III-3).

D'autre part, les forces de Lorentz, le long du milieu de la plaque mobile (Figure III.4), sont très importantes, surtout au niveau de l'extrémité, capables de déformer cette dernière de manière plastique, augmentant rapidement avec le temps jusqu'à l'impact entre les deux plaques d'aluminium ($t=10\mu\text{s}$).

Pour ce qui est de la déformation de la plaque mobile, cette dernière montre une déformation accentuée au niveau de l'extrémité qui se trouve soudée avec la plaque fixée et reflète bien la distribution de la force magnétique appliquée (Figure III.5).

L'évolution dans le temps de la déformation (Figure III.6) met en évidence la progression temporelle de l'assemblage qui ressemble au soudage par point. Cela est certainement expliqué par l'entrefer, relativement important (1mm), entre l'inducteur et la plaque mobile en Aluminium.

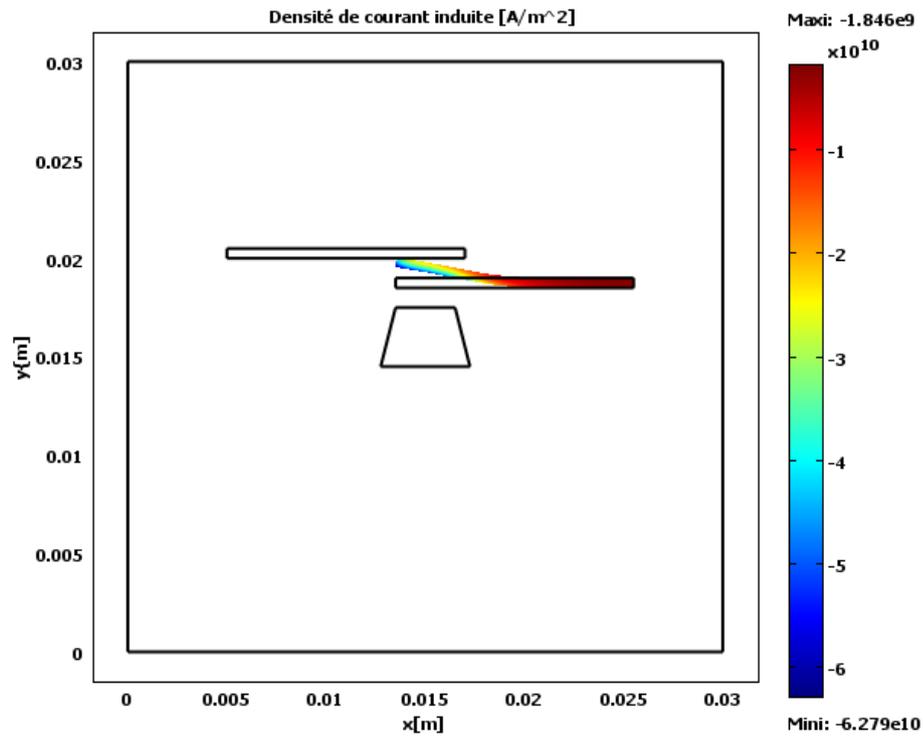


Figure III.3: Densité de courant induite à $t=10\mu s$

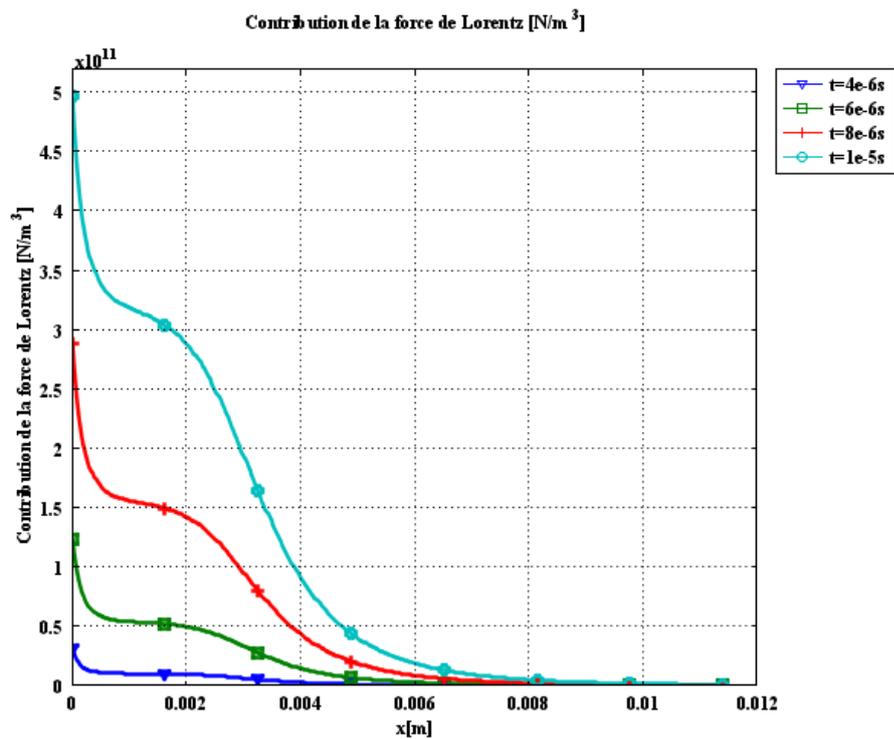


Figure III.4: Variation de la distribution des forces EM le long de la plaque mobile

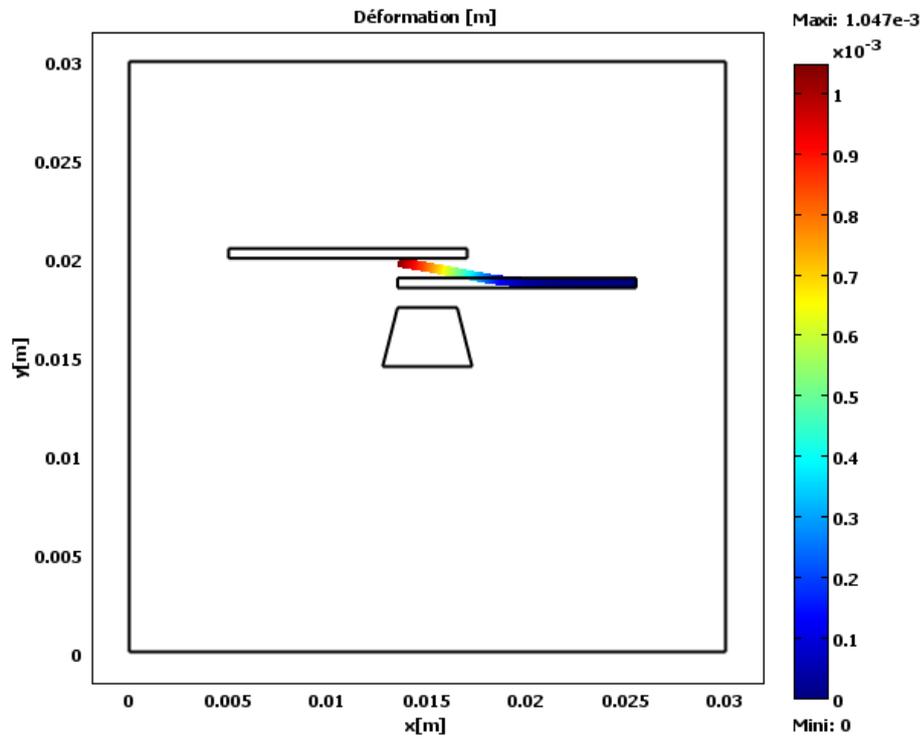


Figure III.5: Assemblage des plaques à $t=10\mu$ s

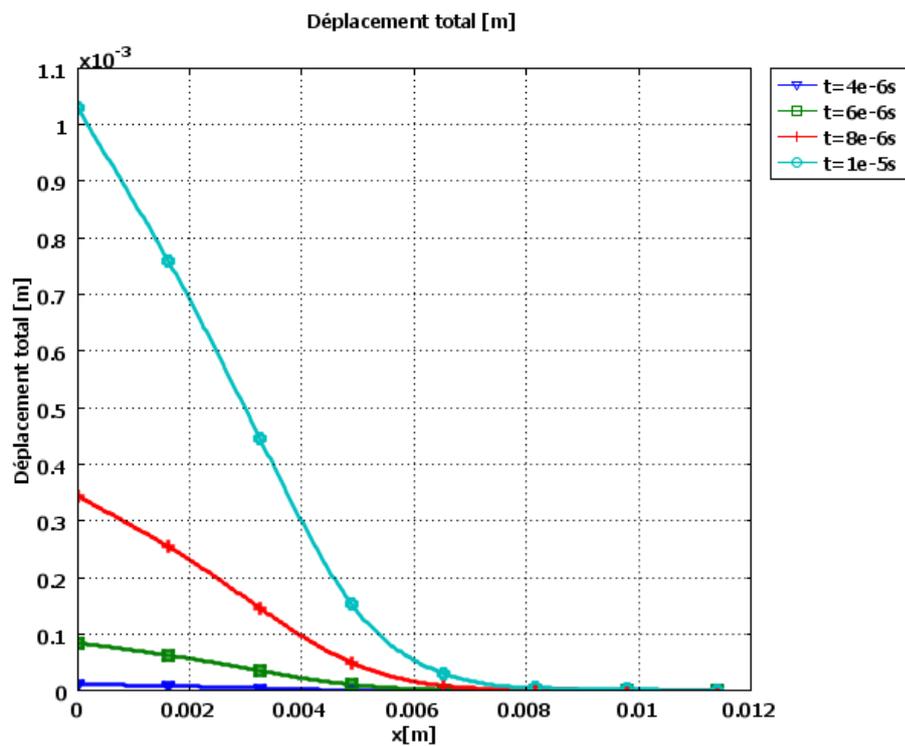


Figure III.6: Evolution temporelle de la déformation de la plaque

Un autre phénomène étudié durant l'assemblage des plaques est le phénomène thermique. La température de la plaque mobile à l'instant d'impact (Figure III.7), montre une répartition semblable à celle des courants induits, ce qui est expliqué théoriquement.

La figure III.8 présente la température au niveau de quatre points situés au milieu de la plaque mobile : A (0.0135 ; 0.01875) B (0.0155 ; 0.01875) C (0.0175 ; 0.01875) D (0.02 0.01875). Il est bien observé une augmentation de la température lors de l'opération d'assemblage, mais sans atteindre la température de fusion du matériau (660°C pour l'aluminium).

Cette augmentation de température est de plus en plus accentuée au niveau de l'extrémité de la plaque où les courants induits, les forces électromagnétiques et l'effet joule sont plus importants. En effet, l'augmentation de la température locale est plus rapide à l'interface entre les deux plaques, où s'effectue l'assemblage et contribue positivement à l'amélioration de la qualité de ce dernier.

Tous ces résultats numériques sont bien validés par ceux trouvés expérimentalement [50].

III.2.3. Analyse des caractéristiques de l'assemblage

Le premier paramètre caractéristique est le temps d'assemblage nécessaire pour le déplacement de la plaque mobile jusqu'à son impact avec l'autre pièce (temps final de simulation). Théoriquement, ce dernier dépend des propriétés géométriques et physiques de l'installation, en particulier la distance entre les deux plaques.

Dans le cas de cette première application, où les plaques sont en aluminium, distantes de 1mm, le temps d'assemblage ne dépasse pas les 10 μ s.

Un autre paramètre important est la vitesse de la plaque mobile durant l'opération d'assemblage, nous pouvons remarquer clairement, que cette vitesse augmente rapidement et montre une vitesse maximale au moment de l'impact (Figure III.9).

Selon les études expérimentales de la technique d'assemblage magnétique, ce dernier est caractérisé géométriquement par sa largeur (largeur de la partie assemblée) et son angle (l'angle entre les deux plaques au moment de l'impact).

Les résultats numériques obtenus par notre modèle (Figures III. 5-6) nous ont permis d'estimer ces deux paramètres : Nous avons trouvé la largeur de l'assemblage de 0.3mm et l'angle d'assemblage d'environ 10°, cela confirme que l'assemblage dans cette application est de type : assemblage par pointe [50].

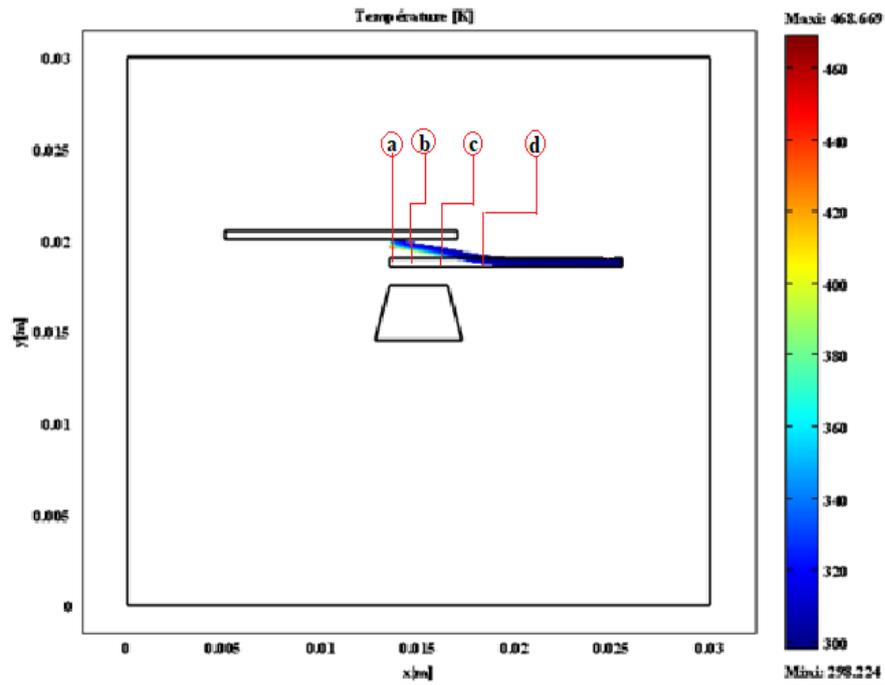


Figure III.7: Répartition de la température le long de la plaque à $t=10\mu s$

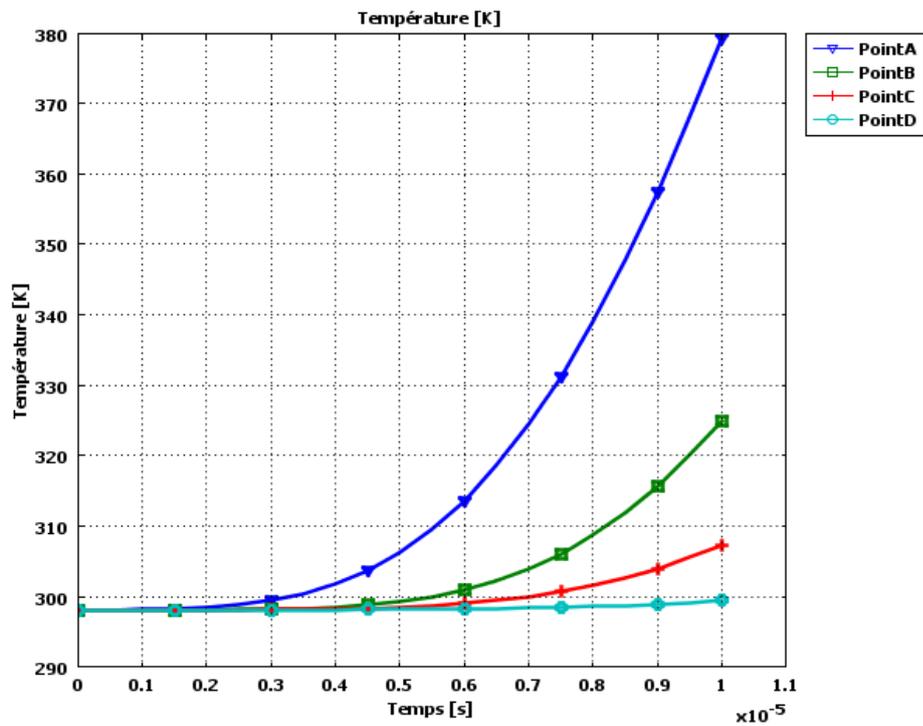


Figure III.8: Profile de température dans la plaque mobile à différents points

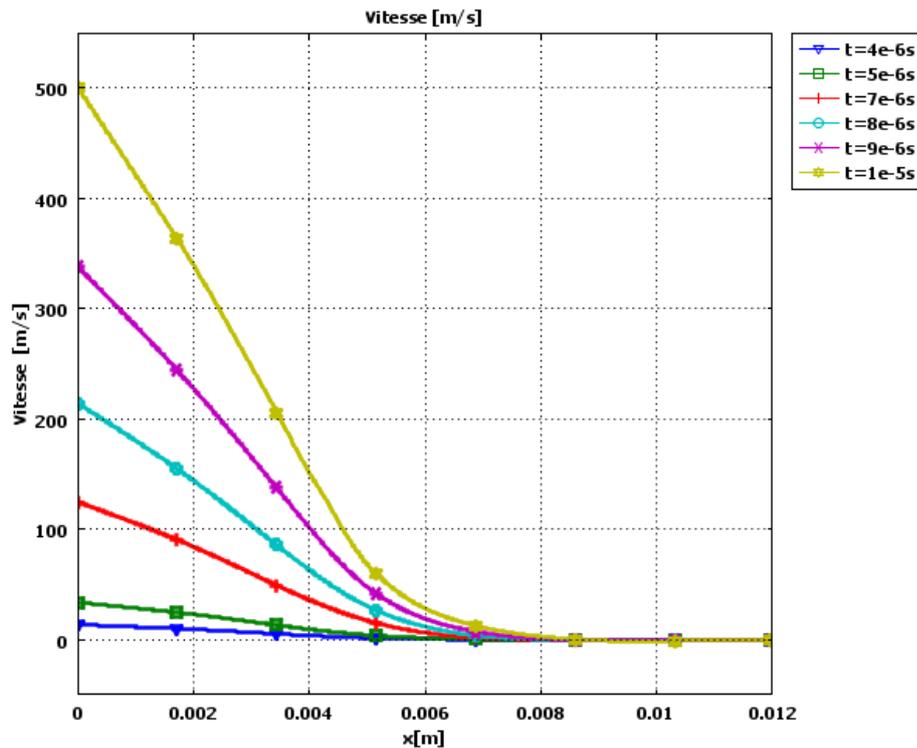


Figure III.9: Evolution temporelle de la vitesse de la plaque mobile durant l'opération d'assemblage

III.2.4. Comportement des différents matériaux sous l'assemblage magnétique

Dans le but d'analyser l'assemblage dissimilaire utilisant différents matériaux des plaques, nous avons comparé le comportement des plaques assemblées, selon la nature de leurs matériaux.

Pour cela, nous avons considéré plusieurs assemblages dissimilaires, en utilisant différents couples de matériaux : Cu/Al – Fe/Al – Mg/Al et Ti/Al.

Le tableau III.2 présente les différentes propriétés physiques des matériaux utilisés.

Dans cette application, toutes les propriétés géométriques sont similaires à celles du système précédent Al/Al sauf que, l'épaisseur de l'entrefer considérée, entre l'inducteur et la plaque mobile est de 0,5mm.

Le comportement mécanique des différentes plaques mobiles considérées, est fortement lié à la nature du matériau de ces dernières (Figure III.10).

En outre, la température à travers les plaques mobiles au moment de l'impact montre des répartitions fortement différentes à cause de la nature des matériaux qui possèdent des propriétés thermiques différentes. Dans tous les cas, la température de la plaque mobile reste toujours inférieure à la température de fusion. (Figure III.11).

En effet, les deux cas d'assemblage dissimilaire Cu/Al et Mg/Al montrent, au moment de l'impact de la plaque mobile, une forme très rapprochée de celle obtenue dans le cas de l'assemblage similaire Al/Al. Cependant, pour les autres cas Fe/Al et Ti/Al, la différence est bien visible. La plaque mobile en Fer montre le meilleur assemblage avec la plaque fixe en Aluminium : la largeur de l'assemblage est plus importante et les deux plaques sont bien soudées l'une à l'autre (Tableau III.3).

Ainsi, les résultats numériques permettent de faire les conclusions suivantes :

- La forme de l'assemblage dépend fortement de la nature du matériau de la plaque mobile et par conséquent des propriétés électriques et mécaniques de la plaque en déformation et donc de la nature de l'assemblage.
- L'assemblage similaire Al/Al est le plus rapide. Néanmoins, les temps d'impact nécessaire pour les assemblages dissimilaires Mg/Al, Cu/Al et Fe/Al sont très rapprochés.
- L'assemblage dissimilaire Fe/Al est celui qui présente des caractéristiques intéressantes (la plus grande largeur et un angle relativement faible).
- L'énergie de décharge nécessaire à l'assemblage magnétique peut être plus ou moins élevée, en fonction des propriétés physiques, en particulier la conductivité électrique de chacun des matériaux.
- Lors du processus d'assemblage magnétique, la température augmente dans la partie, face à l'inducteur (partie à assembler) et favorise son impact avec la plaque fixe en Aluminium.

Tableau III.2 : Propriétés des différents matériaux utilisés dans l'assemblage de plaques

	Aluminium	Cuivre	Fer	Magnésium	Titanium
Densité volumique [kg/m³]	2700	8700	7870	1770	4940
Conductivité électrique [S/m]	$3.774 \cdot 10^7$	$5.998 \cdot 10^7$	$1.12 \cdot 10^7$	$1.087 \cdot 10^7$	$7.407 \cdot 10^5$
Module de young [Pa]	$70 \cdot 10^9$	$110 \cdot 10^9$	$200 \cdot 10^9$	$45 \cdot 10^9$	$105 \cdot 10^9$
Coefficient de poisson	0.33	0.35	0.29	0.35	0.33
Conductivité thermique[W/(m.K)]	160	400	76.2	96	7.5
Capacité calorifique [J/(kg.K)]	900	385	440	1000	710
Température de fusion [K]	660	1083	1538	650	1668
Perméabilité magnétique relative	1	1	4000	1	1

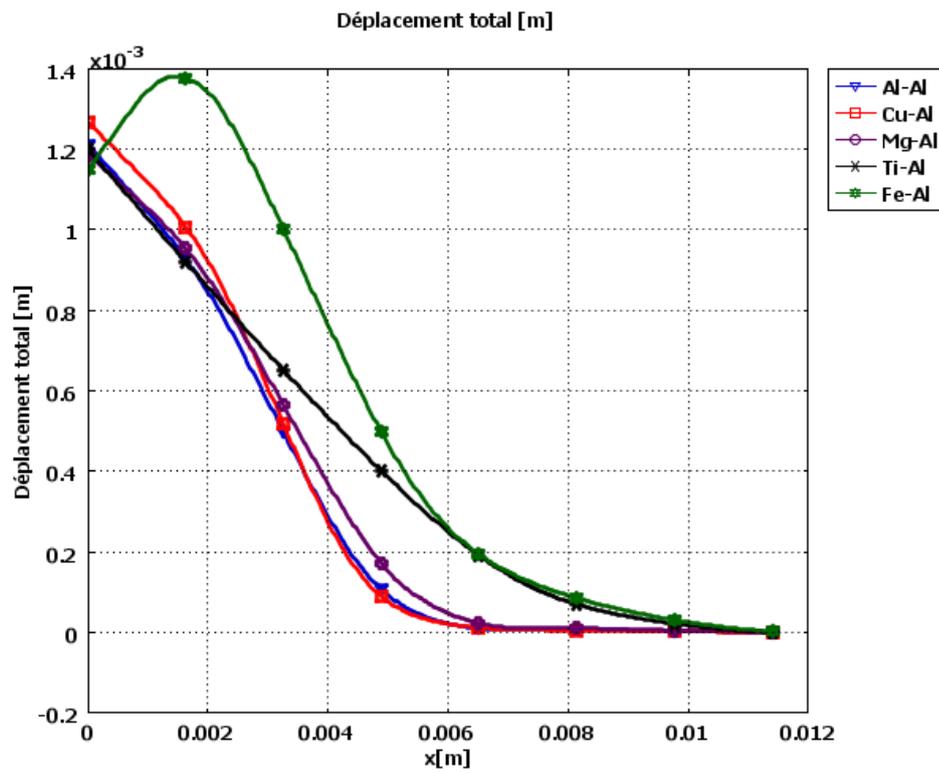


Figure III.10: Déformation de la plaque mobile selon la nature de son matériau

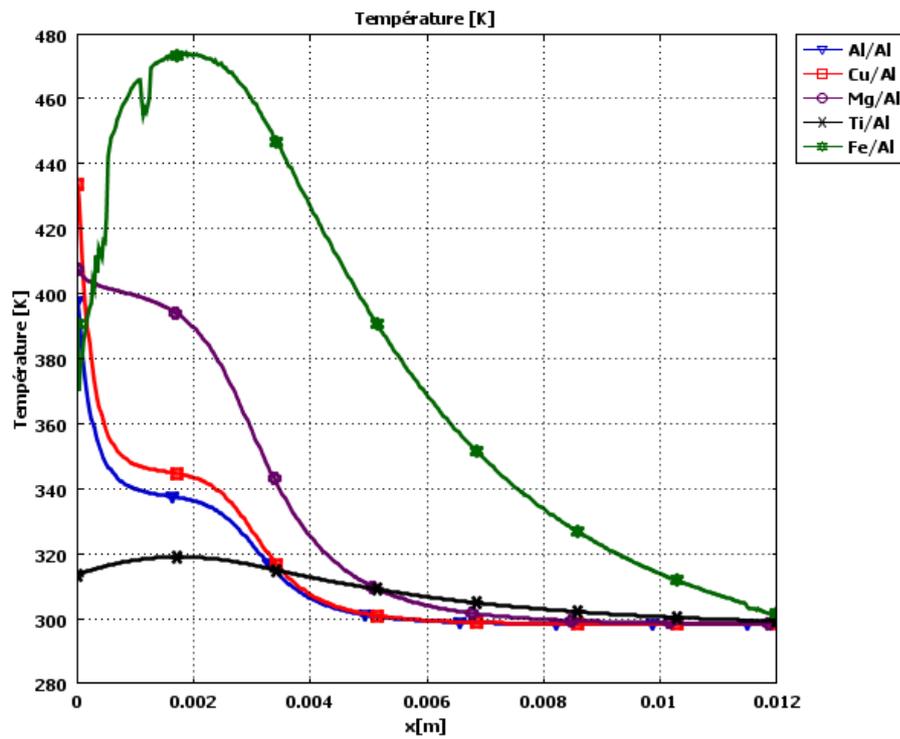


Figure III.11: Répartitions de la température pour différents assemblages

Tableau III.3 : Caractéristiques des différents assemblages

Nature de l'assemblage	t _{max} [μs]	Largeur de l'assemblage [mm]	Angle de l'assemblage [°]
Ti-Al	25	1.25	12
Cu-Al	11	1.80	22
Fe-Al	8,5	3.00	18
Mg-Al	9	1.40	15
Al-Al	8,75	1.35	19

III.2.5. Effet de l'entrefer entre l'inducteur et la plaque mobile

Selon les études expérimentales antérieures [50], le processus d'assemblage par impulsion magnétique dépend des paramètres géométriques et physiques de l'installation. Parmi les paramètres géométriques, l'écart entre l'inducteur et la plaque mobile influe fortement sur l'assemblage magnétique et sa faisabilité.

Théoriquement, en éloignant la plaque de l'inducteur, les courants induits, les forces magnétiques et par conséquent, le déplacement de la plaque et la largeur d'assemblage diminuent, cependant, le temps d'impact augmente. Le contraire est valable : l'assemblage est d'autant plus favorable que l'entrefer entre l'inducteur et la plaque est plus petit. Cela explique les résultats obtenus numériquement (Figure III.12).

Les mêmes remarques sont observées pour la température à travers la plaque mobile, en faisant varier l'épaisseur de l'entrefer entre cette plaque et l'inducteur : en rapprochant l'inducteur des plaques, l'augmentation thermique est accentuée surtout sur la partie à assembler. De plus, il est bien remarqué, que l'extrémité de la plaque mobile est la partie la plus chauffée lors de l'assemblage magnétique (Figure III.13).

D'autre part, la nature de la collision des plaques est aussi influée par l'entrefer, il est bien observé que, si l'inducteur est relativement éloigné de la plaque mobile (2mm) l'assemblage des deux plaques est de nature par pointe, par contre, si l'inducteur est en contact direct avec la plaque mobile, la région face à l'inducteur est totalement assemblée (Tableau III.4).

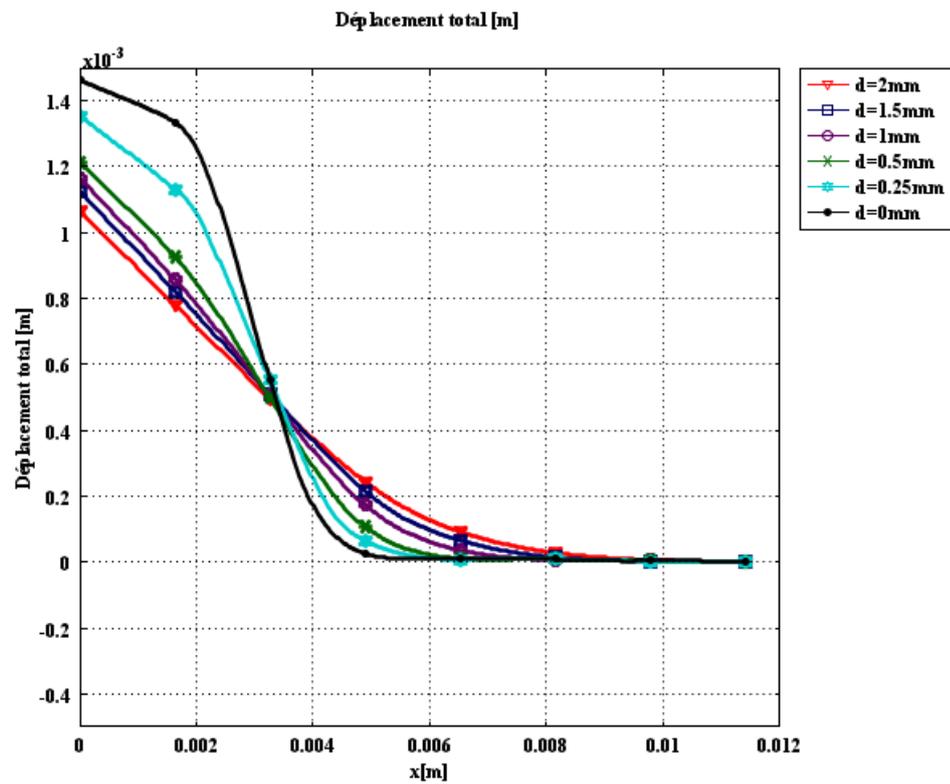


Figure III.12: Déplacements de la plaque pour les différents entrefers

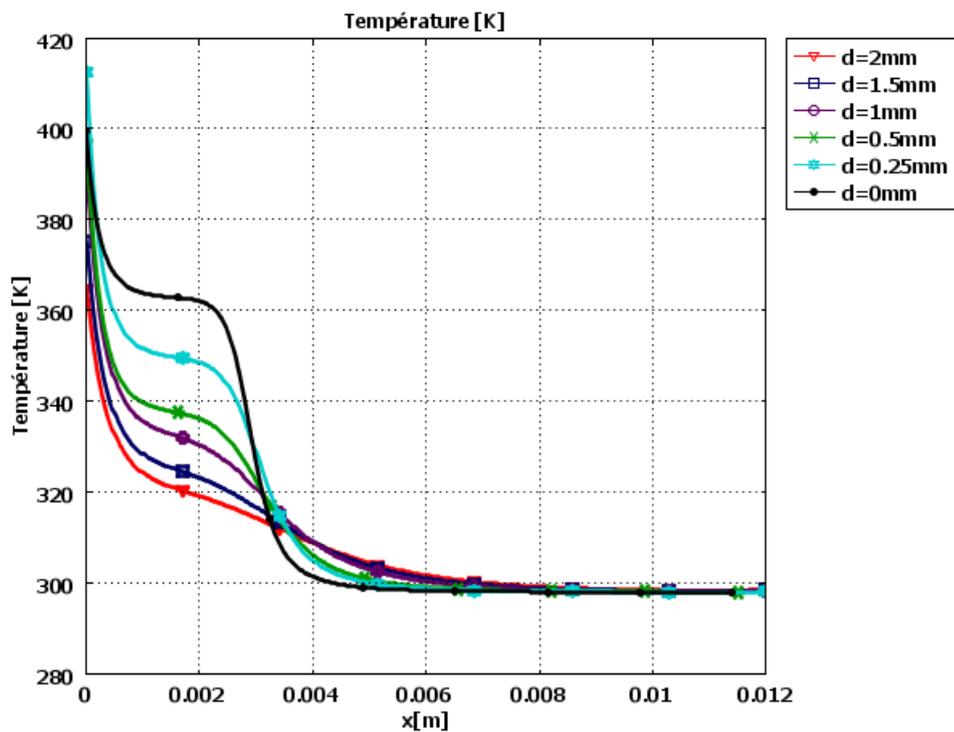


Figure III.13: Distribution de la température le long de la plaque mobile pour différents entrefers

Tableau III.4 : Effet de l'entrefer d sur la faisabilité de l'assemblage magnétique

d [mm]	t_{max} [μs]	Largeur de l'assemblage [mm]
2	12,5	0,4
1,5	11,5	0,6
1	10,25	1,0
0,5	8,75	1,4
0,25	8	2,3
0	6,75	2,8

III.2.6. Effet du courant de décharge

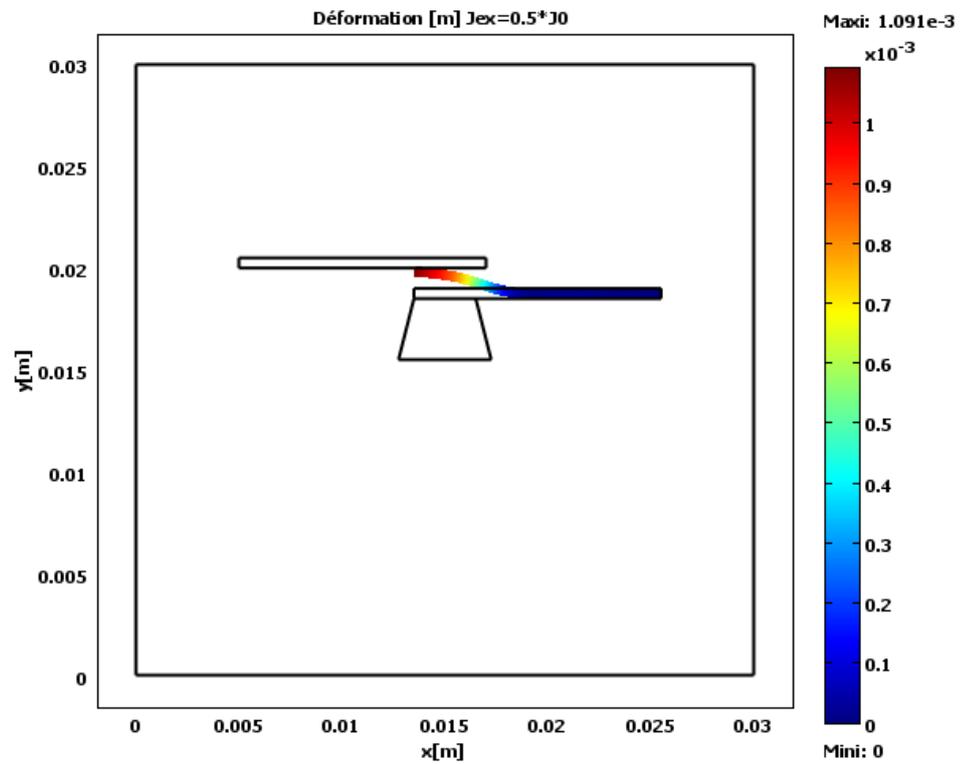
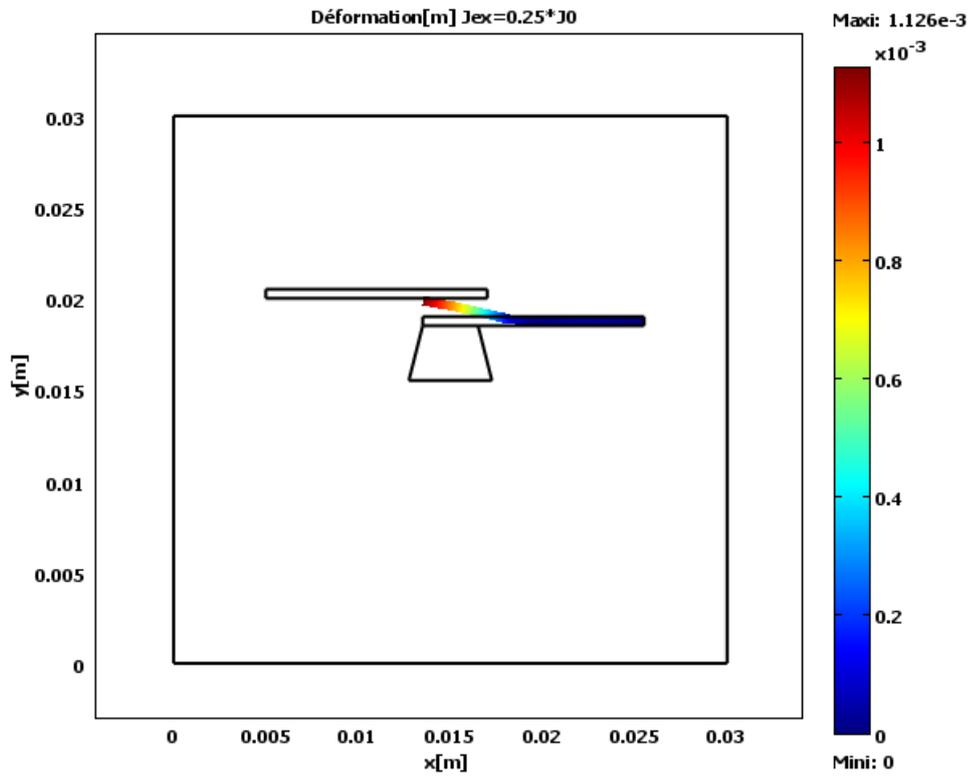
Une autre analyse paramétrique est celle qui concerne l'effet de la puissance du générateur d'impulsion sur l'assemblage magnétique. Différents courants de décharges ont été considérés dans cette simulation, en choisissant un entrefer $d=0\text{mm}$.

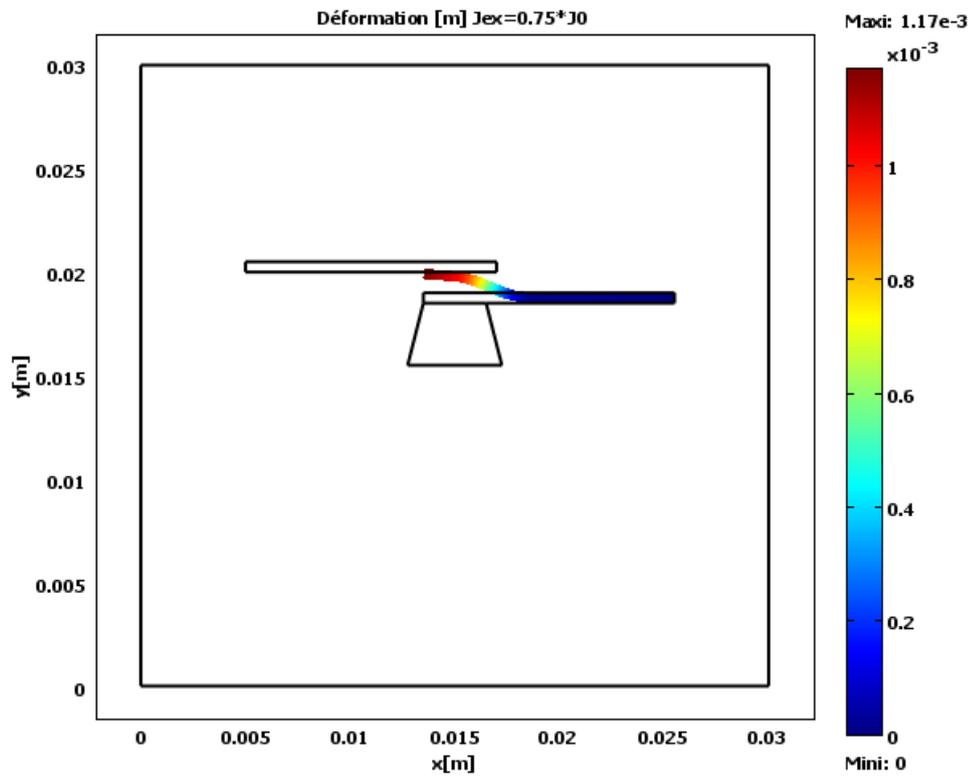
Les résultats numériques (Figure III.14-15) montrent bien des formes différentes en fonction de l'amplitude du courant d'excitation.

De plus, il a été bien remarqué que, l'énergie de décharge et donc le courant d'excitation influe fortement sur le temps de collision, la vitesse d'assemblage, sa largeur et l'angle d'impact et par conséquent c'est un paramètre important de la faisabilité de l'assemblage magnétique.

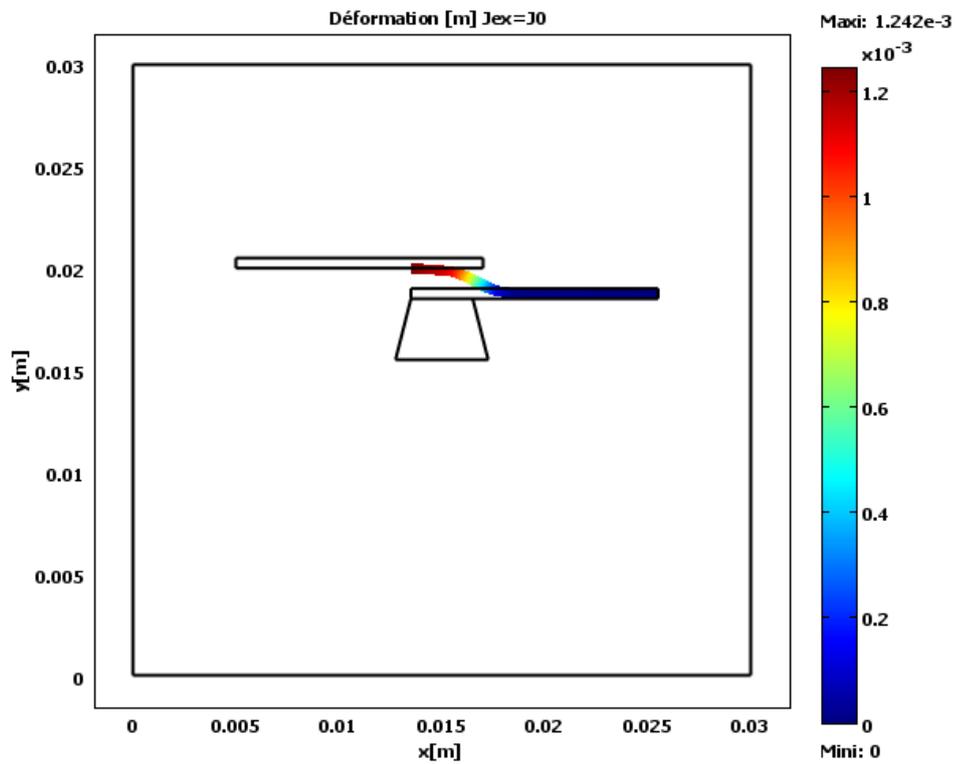
Pour ce qui est de la température à travers la plaque mobile, cette dernière varie proportionnellement avec le courant d'excitation. Cela est expliqué théoriquement par le fait que l'échauffement de la plaque, favorisant l'assemblage, est lié à l'effet Joule dû aux courants induits. Néanmoins, la température de la plaque assemblée n'atteint jamais la température de fusion de l'Aluminium (Figure III.16).

Nous pouvons conclure que l'assemblage magnétique est favorisé par l'augmentation de la puissance du générateur, ses caractéristiques sont améliorées, en particulier sa largeur et sa forme [50].

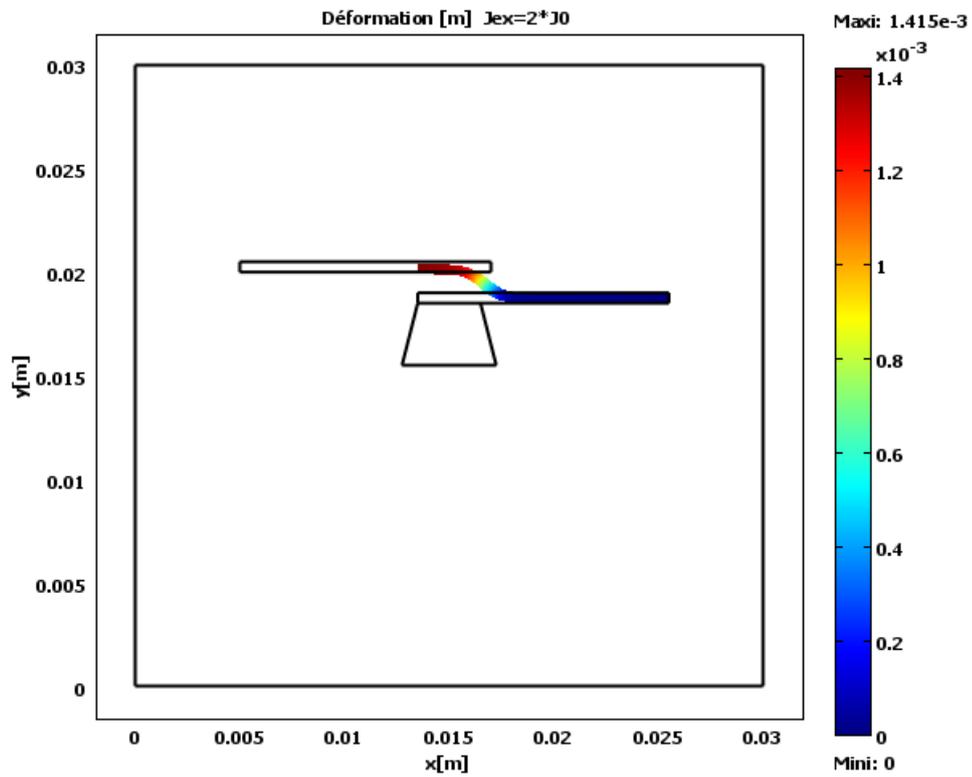




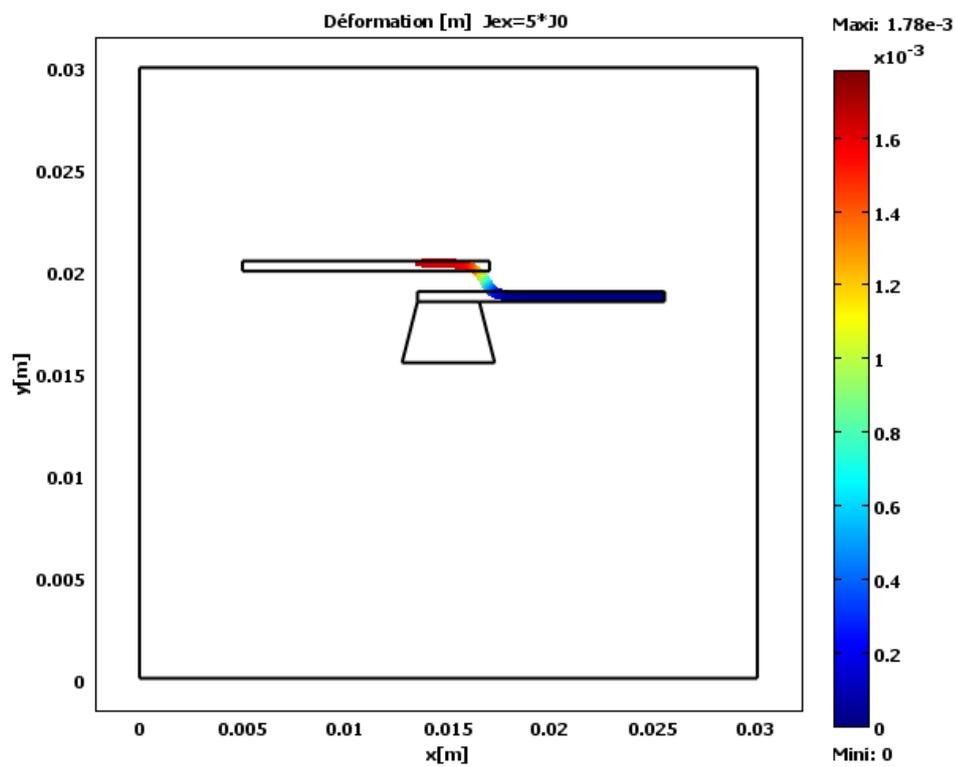
(c) : $J_{ex}=0,75 J_0$



(d) : $J_{ex}=J_0$



(e): $J_{ex} = 2 J_0$



(f): $J_{ex} = 5 J_0$

Figure III.14: Formes d'assemblages obtenues avec différents courants de décharge

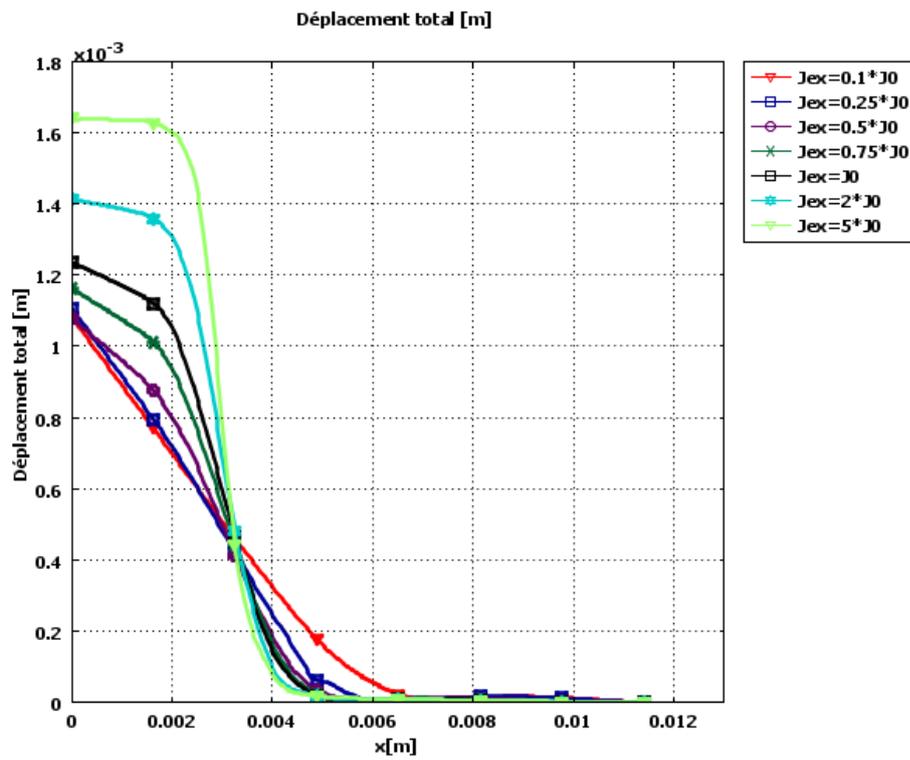


Figure III.15: Déplacements de la plaque mobile avec différents courants de décharge

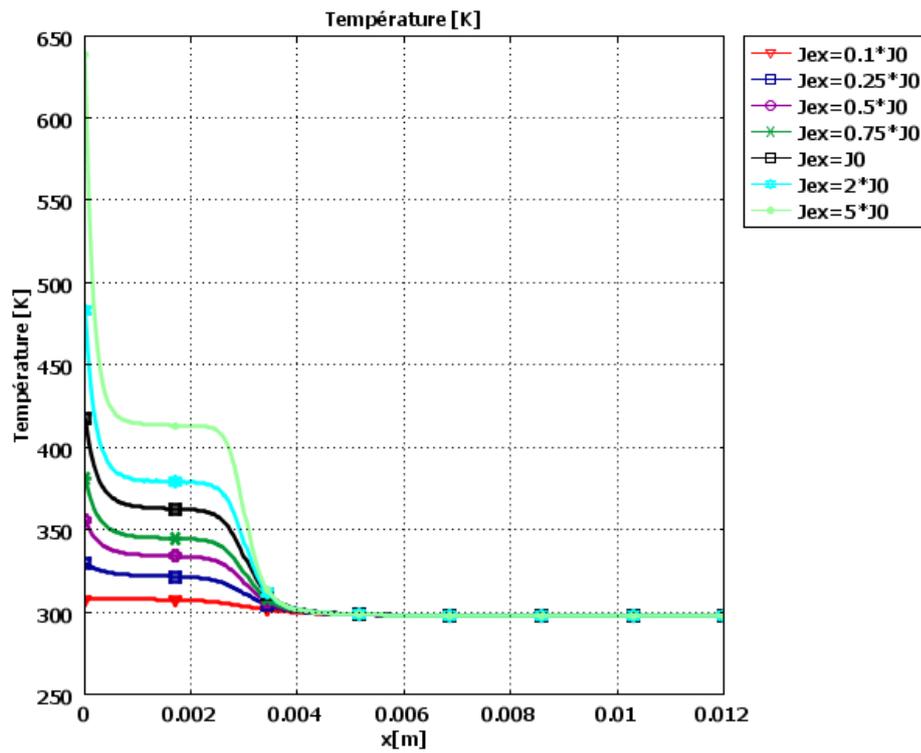


Figure III.16: Température le long de la plaque mobile avec différents courants de décharge.

III.3.Assemblage par impulsion magnétique d'un tube avec un noyau intérieur

III.3.1.Système modélisé

Cette deuxième application concerne l'assemblage par impulsion magnétique des pièces tubulaires, qui est une application beaucoup utilisée dans le domaine industriel [51].

La configuration simulée comporte un noyau cylindrique, à l'intérieur d'un tube, les deux en Aluminium, entourés d'un inducteur tubulaire en cuivre. Toutes les dimensions géométriques sont montrées dans la figure III.17 [51].

Dans la simulation numérique, seulement la moitié de la géométrie est modélisée, grâce à la symétrie axiale du système (Figure III.18).

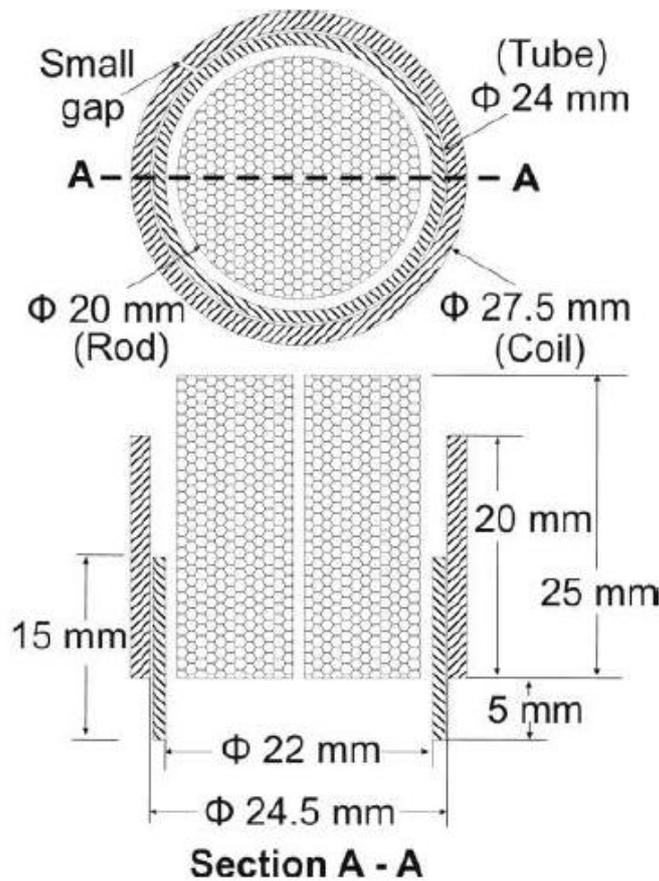


Figure III.17: Installation d'assemblage des tubes [51]

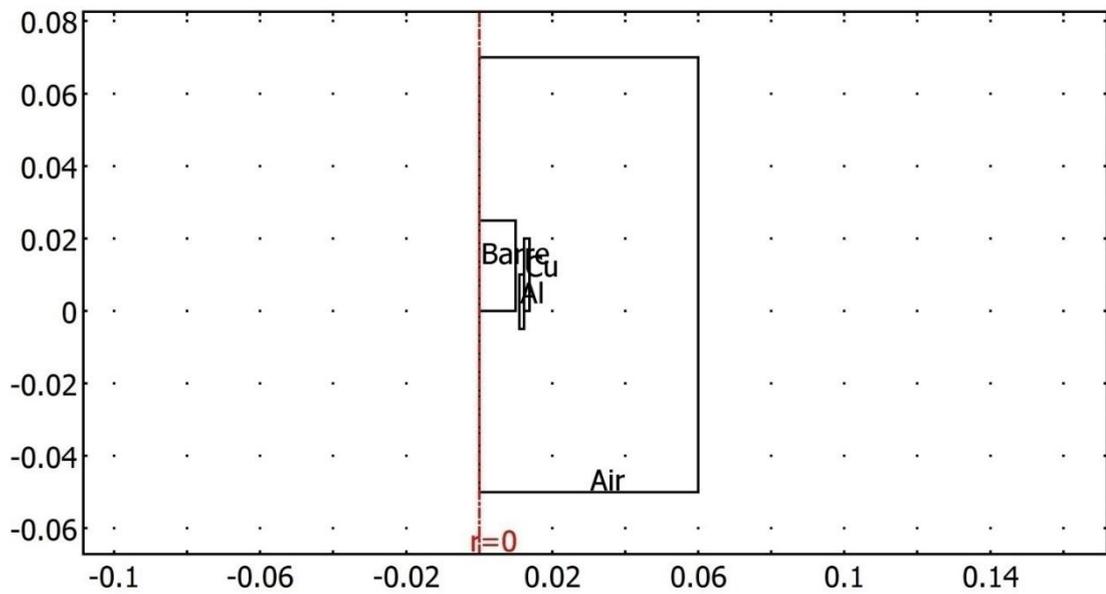
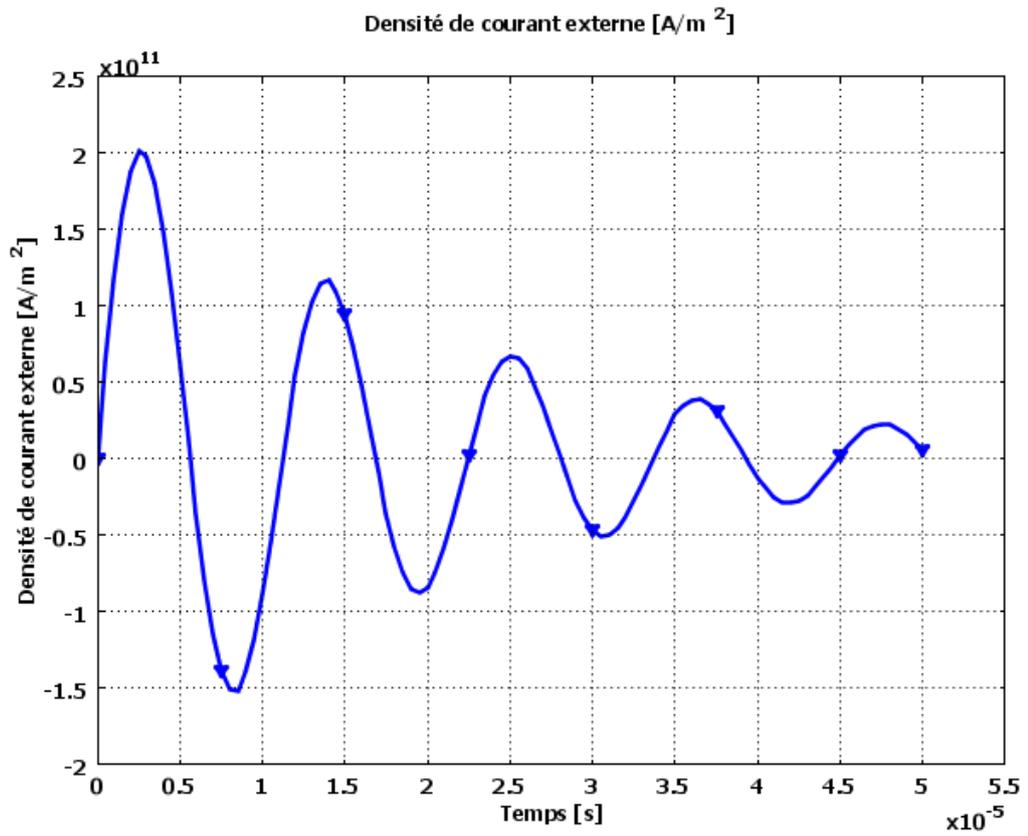


Figure III.18: Géométrie modélisée correspondant à l'assemblage de tubes sur le noyau

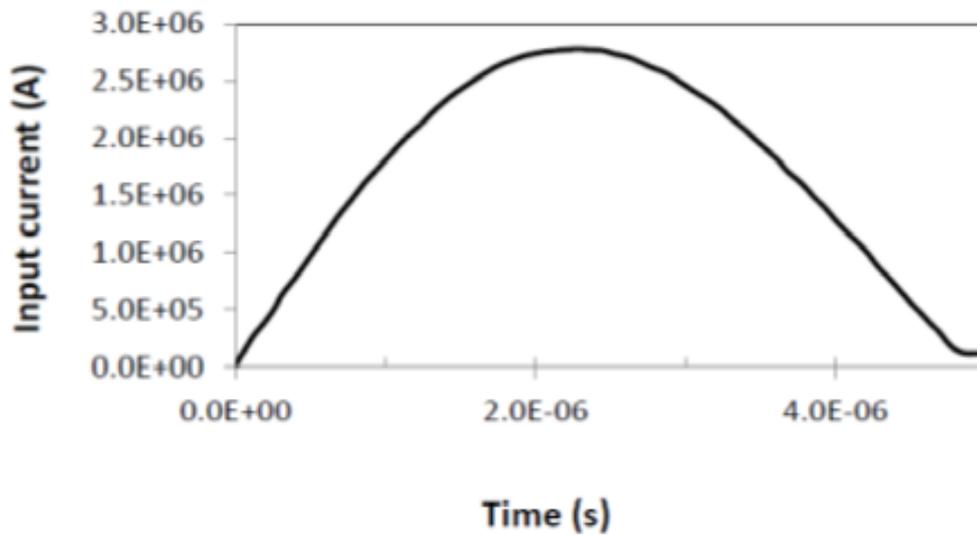
III.3.2. Courant de décharge

Le courant de décharge (III.2), considéré dans la simulation de cette application se rapproche de celui utilisé par la référence [51] (Figure III.19). Cette densité est toujours, de forme impulsionnelle :

$$J_z = 23 e^{10} \cdot \exp(-49e^5 \cdot t) \cdot \sin(56e^4 \cdot t) \quad (\text{III.2})$$



(a)



(b)

Figure III.19: (a) : Densité de courant externe considérée dans la simulation (b) : Courant considéré dans la référence [51]

III.3.3. Résultats numériques

Une deuxième application de notre modèle numérique, est la simulation numérique de l'installation industrielle, concernant l'assemblage par impulsion magnétique d'un tube avec un noyau intérieur [51]. Les résultats numériques révèlent qu'au bout de $10\mu\text{s}$, le tube est bien assemblé avec le noyau intérieur, au niveau de la partie face à l'inducteur, avec une longueur de 7,5mm (Figures III.20-21).

Cette région se trouve accélérée et propulsée avec des vitesses, de plus en plus fortes, jusqu'à l'impact avec le noyau (Figure III.22).

D'autre part, la distribution de la température le long du tube assemblé à $t=10\mu\text{s}$, qui est due à l'effet Joule, est quasiment homogène et les variations de température ne sont pas significantes (Figure III.23).

Ce résultat est aussi confirmé par les profils de température, à différents instants de l'assemblage, au milieu de son épaisseur (Figure III.24).

Cependant, les profils de température, au niveau du bord extérieur du tube (Figure III.25), met en évidence une augmentation rapide pendant la collision et au niveau du sommet du tube, et cela favorise l'assemblage du tube avec le noyau pendant son impact.

Cependant, cette augmentation de la température n'atteint jamais la température de fusion de l'Aluminium, ce qui est bien confirmé pratiquement.

Tous les résultats numériques précédents sont validés, aussi bien théoriquement que expérimentalement.

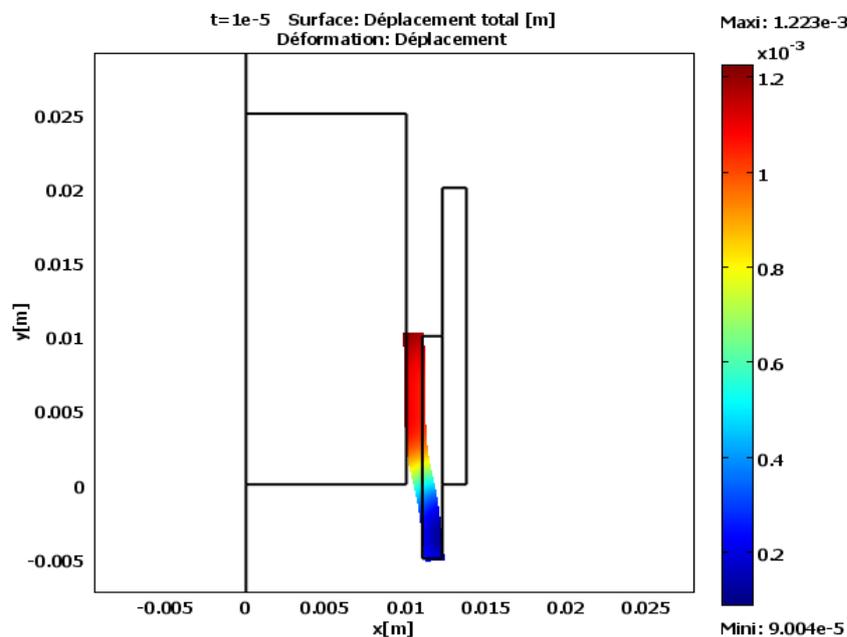


Figure III.20: Assemblage du tube au noyau à $t_{\text{max}}=10\mu\text{s}$

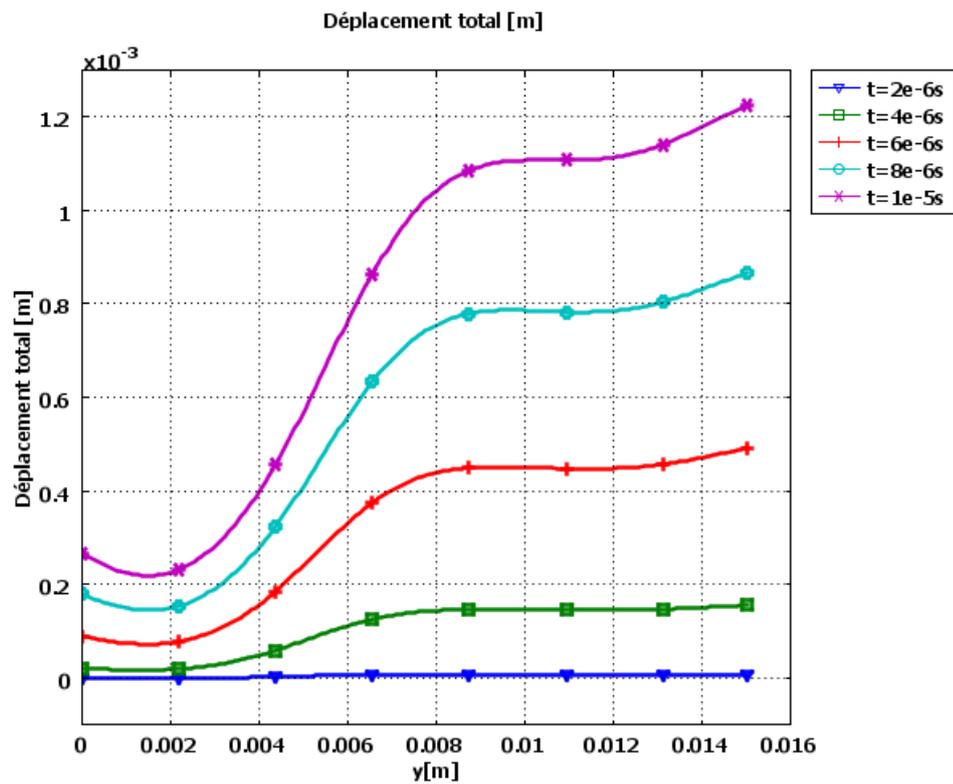


Figure III.21: Variations du déplacement du tube pendant l'assemblage magnétique

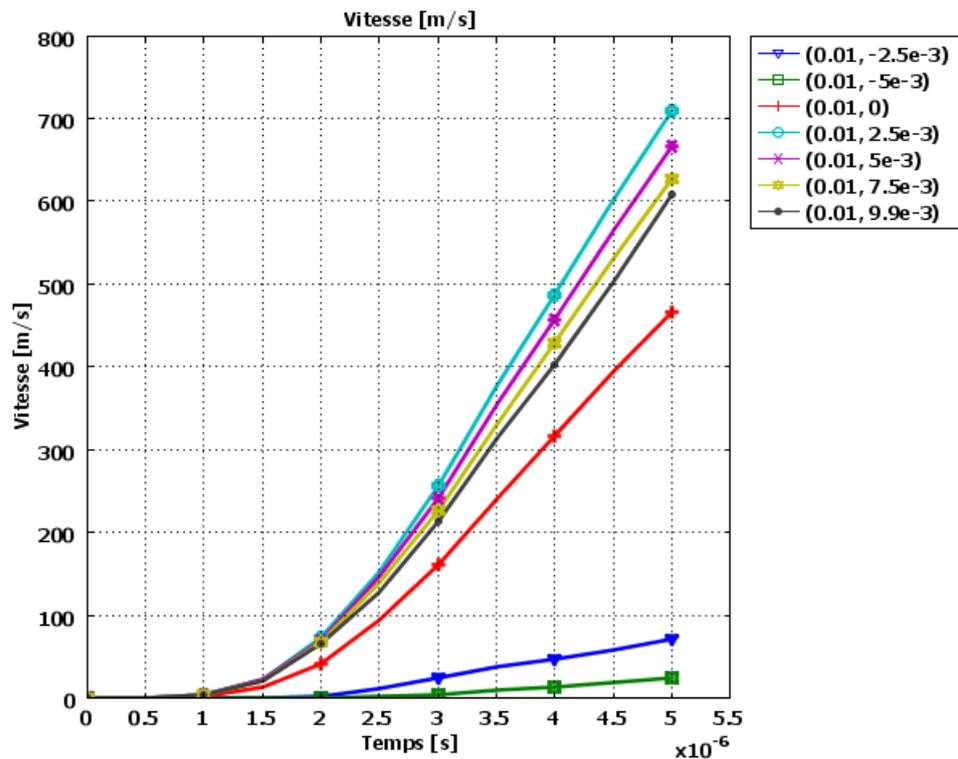


Figure III.22: Variations de la vitesse au niveau de certains points du tube

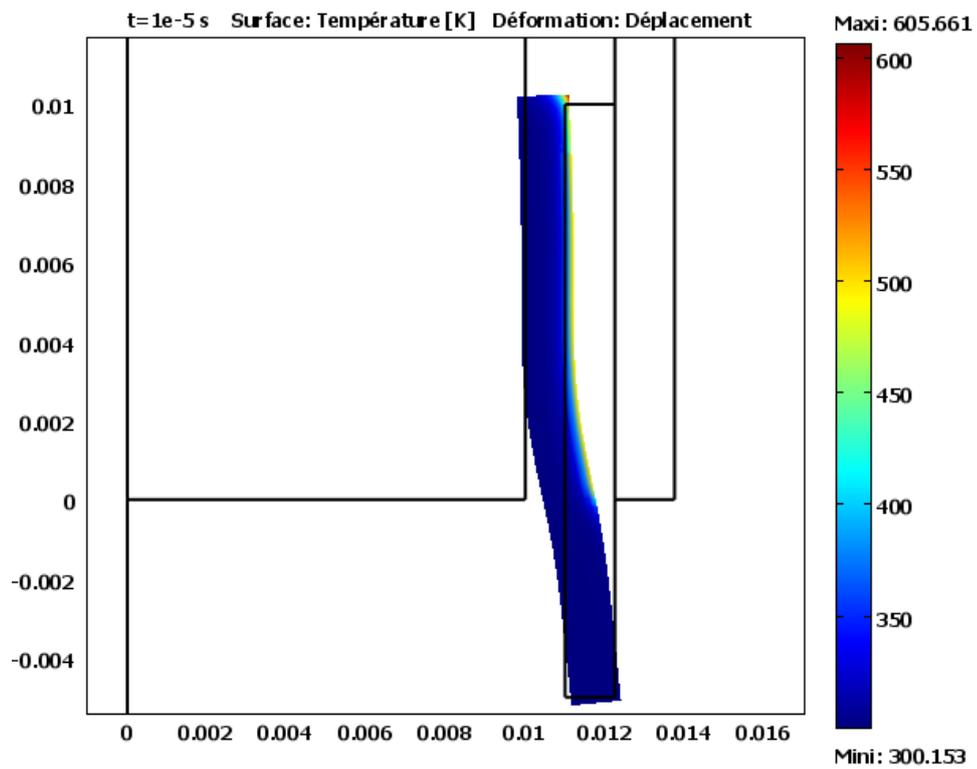


Figure III.23: Distribution de la température à travers le tube assemblé à $t=10\mu\text{s}$

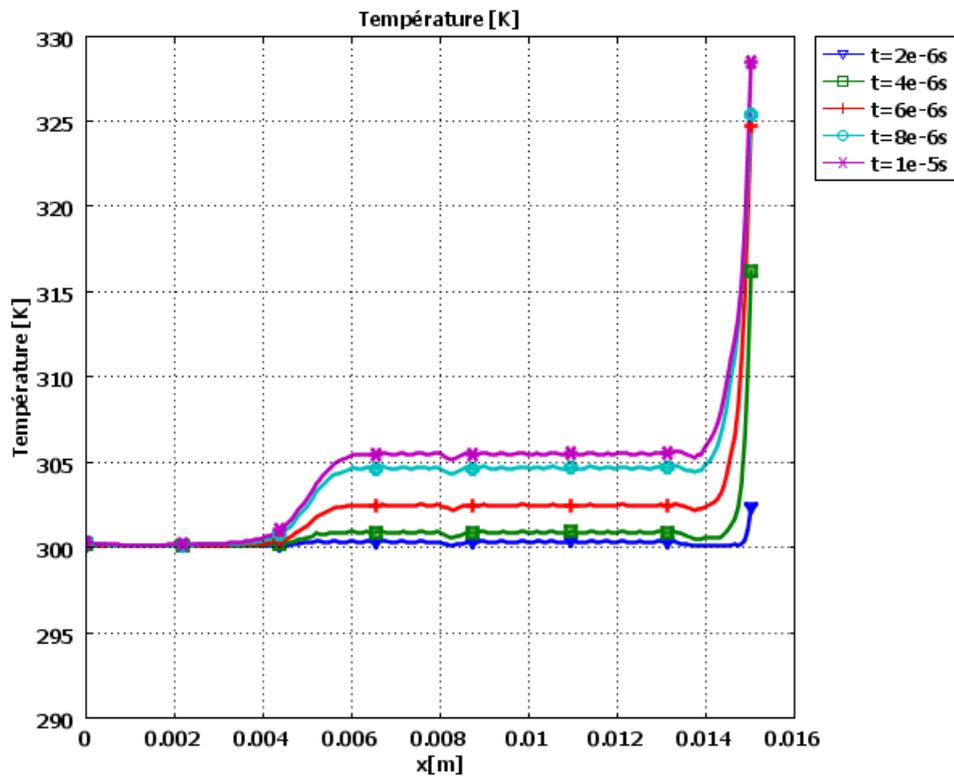


Figure III.24: Variations temporelles de la température au milieu de l'épaisseur du tube

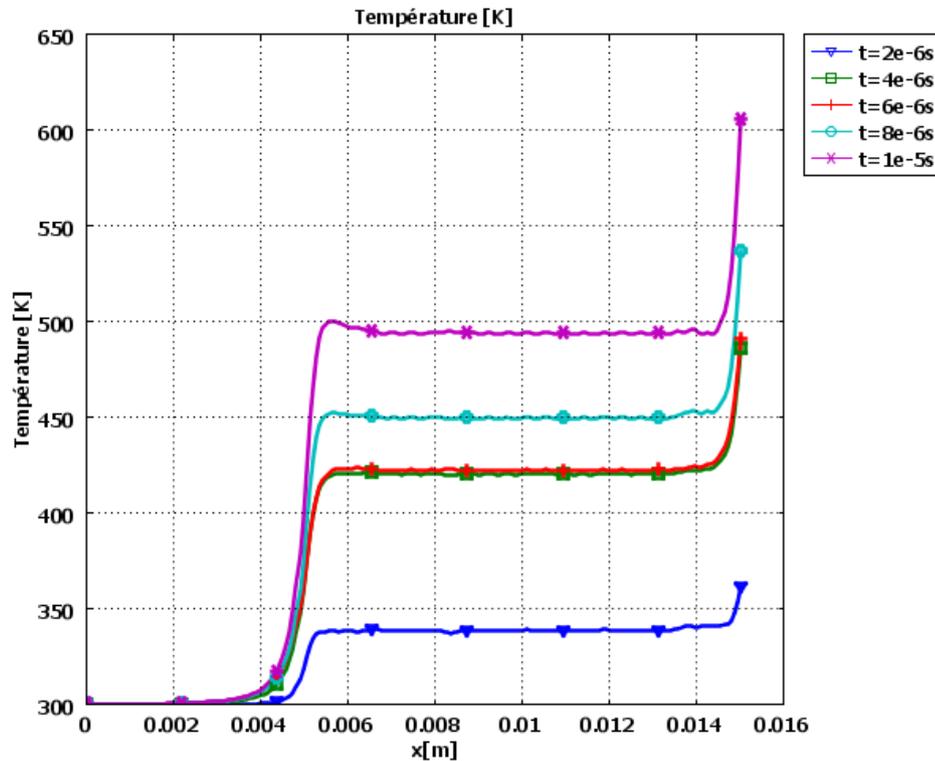


Figure III.25: Variations temporelles de la température au niveau du bord extérieur du tube

III.3.4. Effet du courant externe

Afin d'analyser l'effet de la puissance du générateur, et par conséquent le courant de décharge sur l'assemblage du tube avec le noyau intérieur, nous avons commencé par considérer un courant double de celui utilisé précédemment (III.2), les résultats numériques, montrent que l'assemblage magnétique est obtenu à $t=5\mu s$, c'est-à-dire qu'il ne nécessite que la moitié de la durée de l'assemblage précédente (Figure III.26).

De plus, la longueur de l'assemblage est plus importante, que précédemment, d'environ 10mm.

Comme dans le cas précédent, le déplacement, et par conséquent, l'assemblage du bord supérieur du tube est accentué, à cause de l'effet de pointe (Figure III.27).

D'autre part, les distributions de la température du tube, durant le processus d'assemblage, à différents instants, montrent que le tube est presque isotherme. L'augmentation de la température du tube est insignifiante, à cause de la constante de temps du phénomène thermique, sauf au niveau de sa pointe supérieure. Cette dernière se trouve chauffée par un effet Joule accentué, à cause du champ et du courant, plus importants en ce point (Figure III.28).

Dans un autre travail, nous avons considéré différents courants de décharge, appliqués à la même installation d'assemblage de tubes.

Les résultats numériques obtenus (Figure III.29) mettent en évidence l'effet de la puissance du générateur appliqué et permettent de conclure que plus le générateur est puissant, plus le courant de décharge est important et plus l'assemblage est court. Dans le cas contraire, si le courant est plus faible, l'assemblage est plus long et nécessite plus de temps (Tableau III.5).

En outre, en comparant la longueur d'assemblage dans les différents cas de courants externes, il est bien remarqué que cette dernière est aussi influencée par le courant de décharge et par conséquent, par la puissance du générateur utilisé, elle est d'autant plus importante que le courant est important. Cependant, un très fort courant ou une puissance très importante peut engendrer un fort impact entre les deux tubes et peut même causer la rupture du tube en déplacement (Tableau III.5).

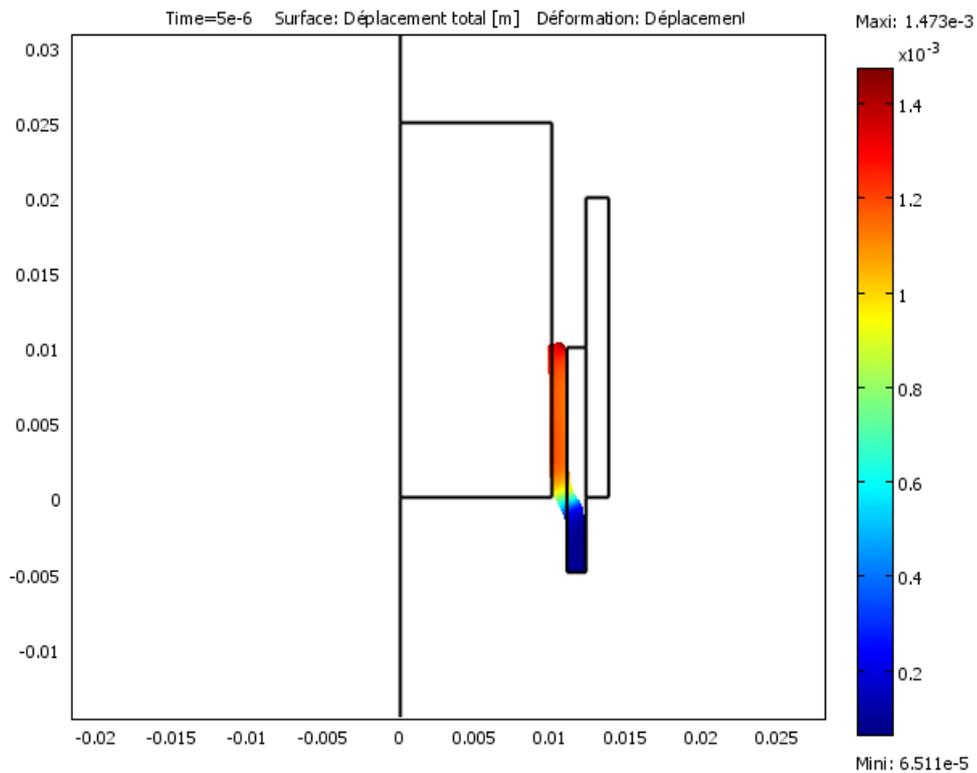


Figure III.26: Assemblage du tube au noyau interne à $t=5\mu\text{s}$ – Courant double

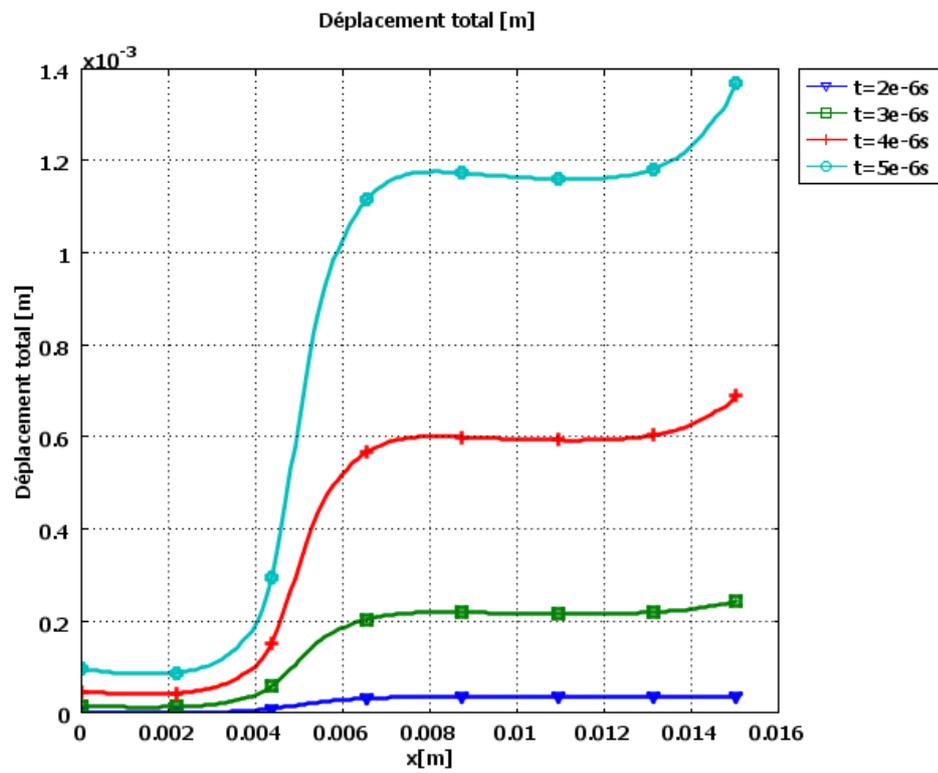


Figure III.27: Déplacement du tube vers le noyau interne durant l'assemblage -Courant double-

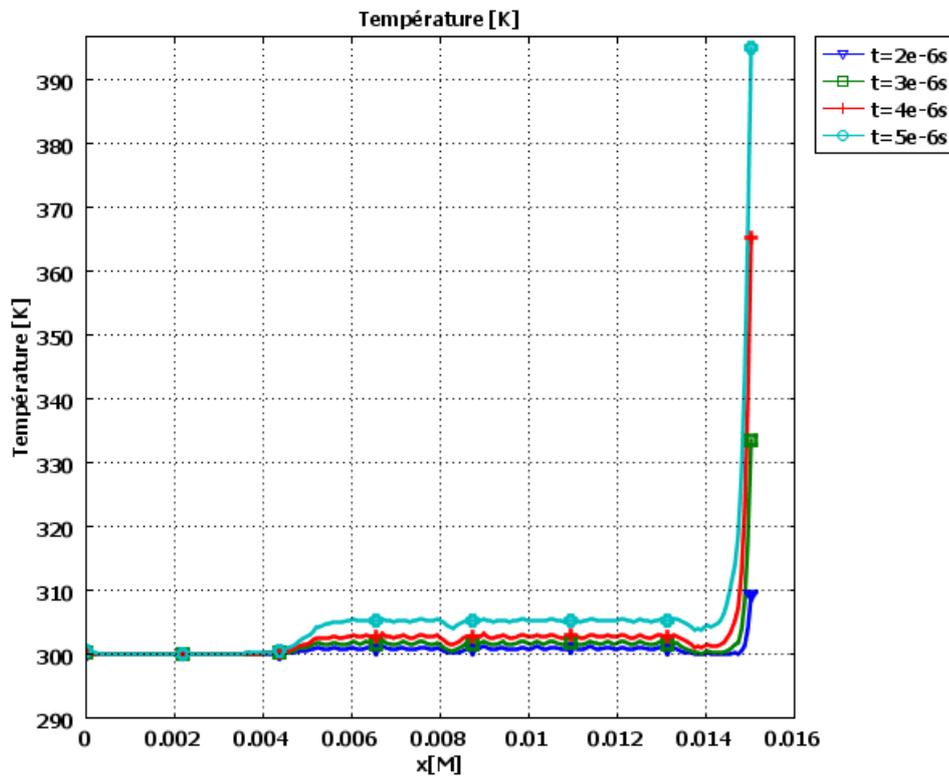


Figure III.28: Distributions de la température du tube pendant l'assemblage

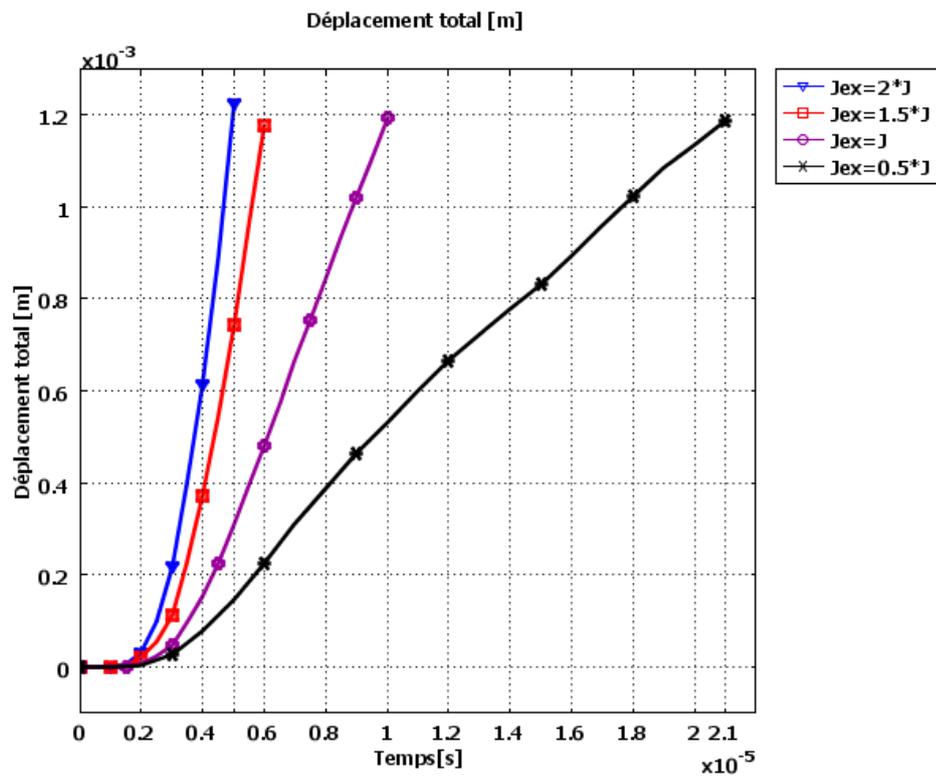


Figure III.29: Déplacement du tube vers le noyau avec différents courants de décharge

Tableau III.5 : Effet du courant de décharge sur la durée de l'assemblage et sa longueur

Densité de courant externe [A/m ²]	tmax [μs]	Longueur de l'assemblage [mm]
0,5 Jex	21	4
$J_{ex} = 23e^{10} \cdot \exp(-49e^5 \cdot t) \cdot \sin(56e^4 \cdot t)$	10	7.5
1,5 Jex	6	8
2 Jex	5	9.5

III.4.Assemblage d'un tube avec un boulon interne

Cette application concerne une installation, purement industrielle, qui permet l'assemblage d'un tube en Aluminium sur un boulon, de forme spécifique.

L'installation expérimentale [13],[52],comporte un inducteur, un conformateur de champ et un porte-échantillon, qui permet d'aligner le tube et le boulon à l'intérieur de la bobine (Figure III.30).

III.4.1.Propriétés géométriques et physiques de l'installation

Notre étude numérique, permet d'analyser, l'effet des paramètres géométriques du tube (l'épaisseur d) et du boulon (offset et l'angle d'inclinaison α) sur la longueur de l'assemblage et sa faisabilité.

Les dimensions géométriques sont présentées dans la (figure III.31), les tubes en Aluminium utilisés, sont de diamètre 50mm et d'épaisseur $d=1\text{mm}$, 1.5mm , 2mm et 3mm . La section du boulon, placé à l'intérieur du tube, possède une longueur de 25mm et un diamètre de 50mm moins deux fois l'épaisseur du tube ; Après 5mm, il ya un biseau de 1mm ou 3mm (offset), d'un angle de 30° .

La zone effective à assembler est la partie conique du boulon, inclinée à 5° , 7.5° , 10° ou 15° [52].

Le système géométrique simulé, comporte en plus du tube et le boulon intérieur un inducteur tubulaire, en cuivre de diamètre 52mm et d'épaisseur 2mm. L'entrefer entre les deux tubes est fixé à 1mm.

L'inducteur massif est parcouru par un courant de forme impulsionnelle (Figure III.32) :

$$J_z = 61 e^{10} \cdot \exp(-49e^3 \cdot t) \cdot \sin(43e^4 \cdot t) \quad (\text{III.3})$$

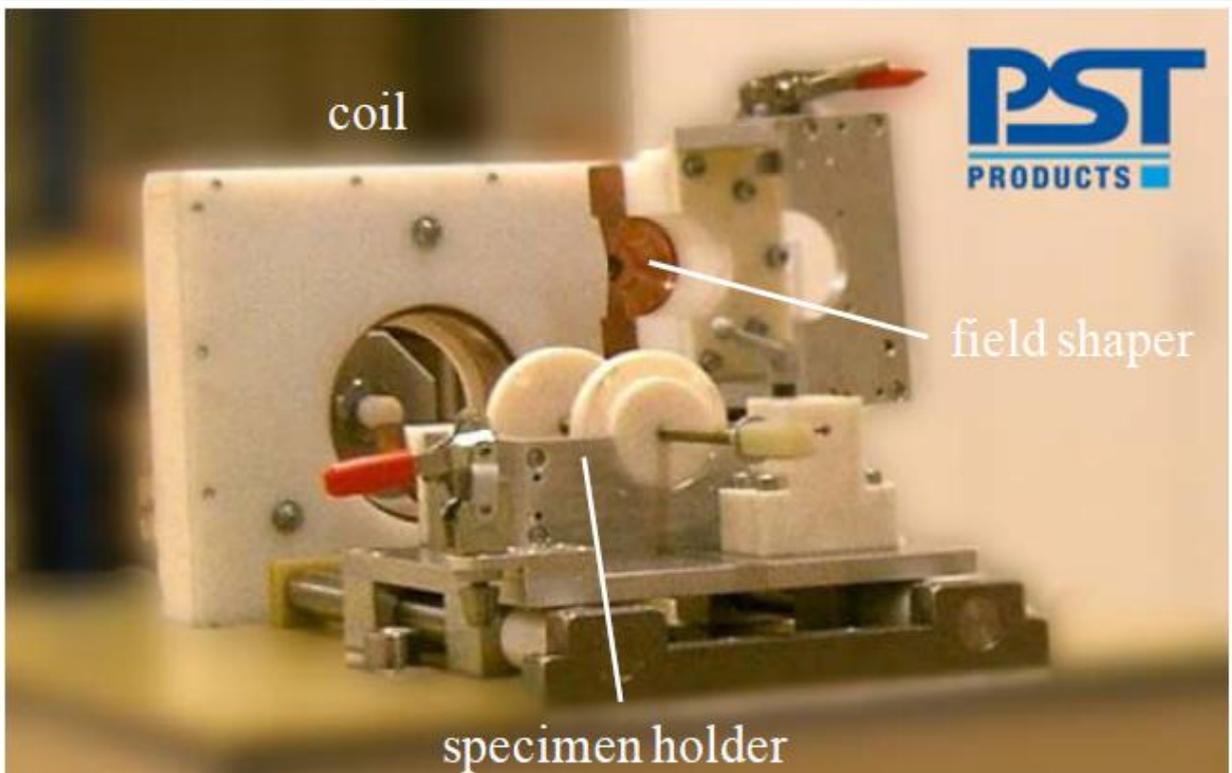


Figure III.30: Installation expérimentale [52]

Figure III. 1

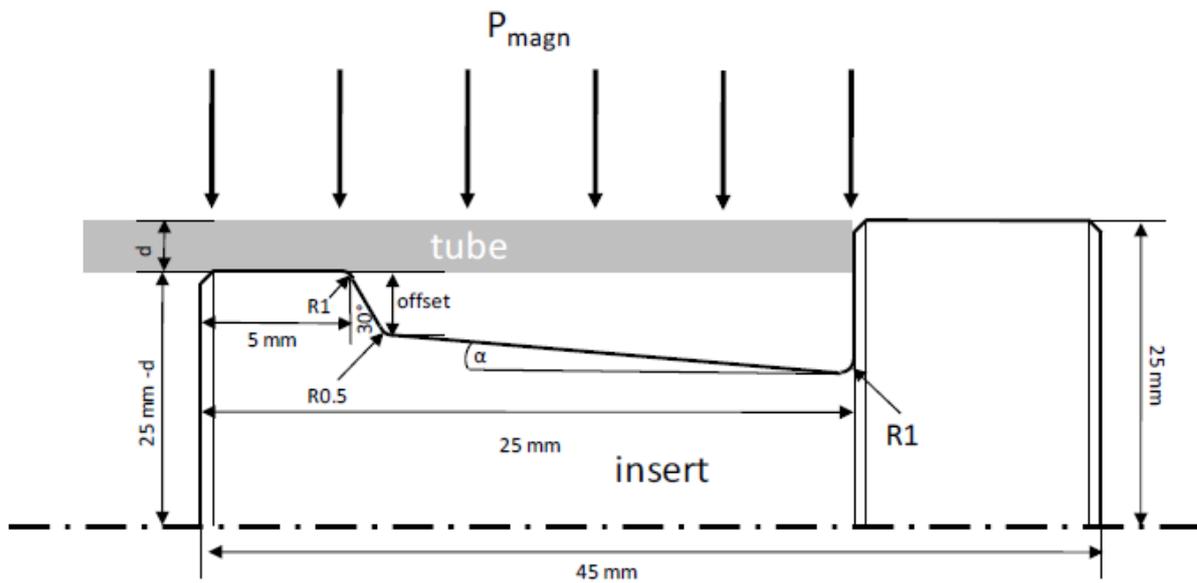


Figure III.31: Système géométrique [52]

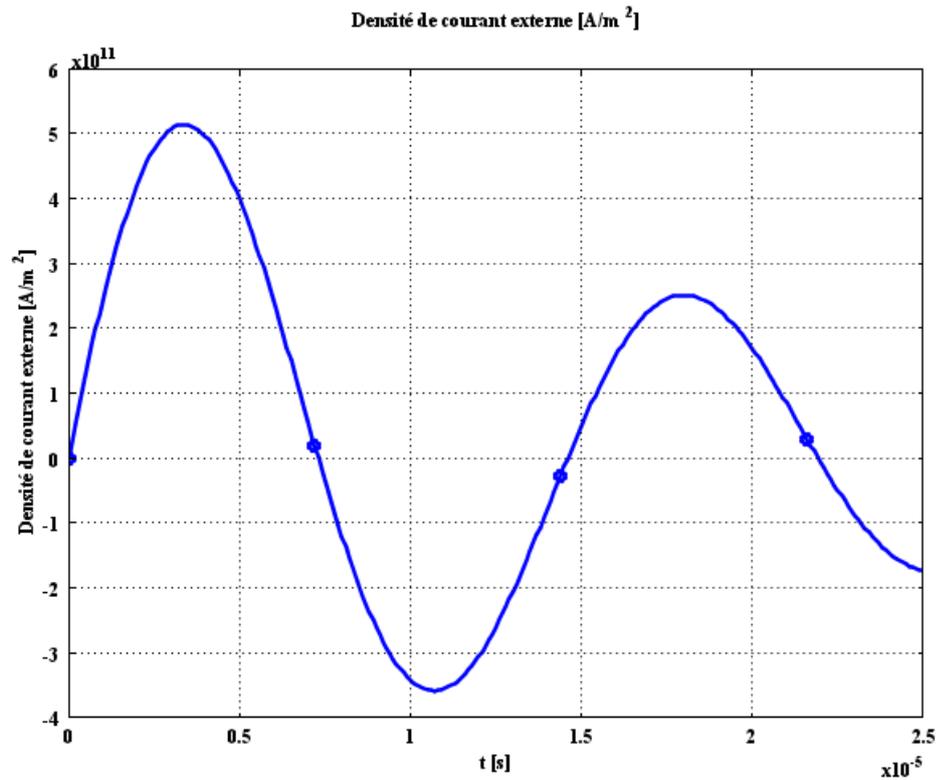


Figure III.32: Courant externe appliqué à l'inducteur

III.4.2. Résultats numériques

Les différentes expérimentations [52] ont été simulées et analysées numériquement, grâce aux modèles développés.

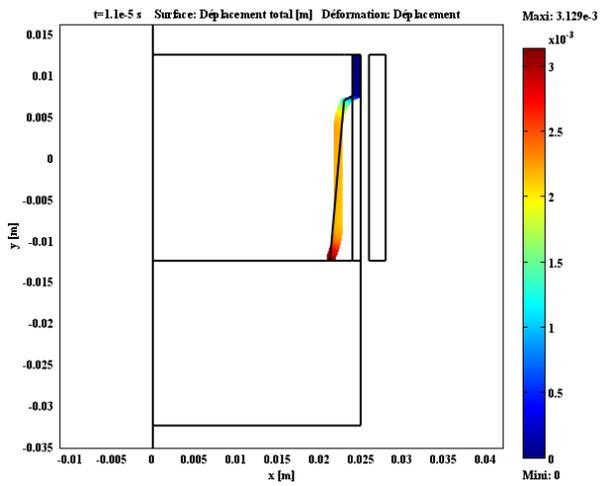
Les différentes formes d'assemblages, obtenues dans les différents cas (Tableau III.6), sont présentées dans les figures III.33.

Nous pouvons bien constater que dans certains cas, l'assemblage entre le tube et le boulon n'a pas eu lieu et la longueur assemblée est très faible, parfois, l'assemblage est complet, sa longueur est maximale et dans d'autres cas, les longueurs assemblées sont différentes selon l'épaisseur du tube en mouvement, l'angle α du boulon et la distance de l'offset.

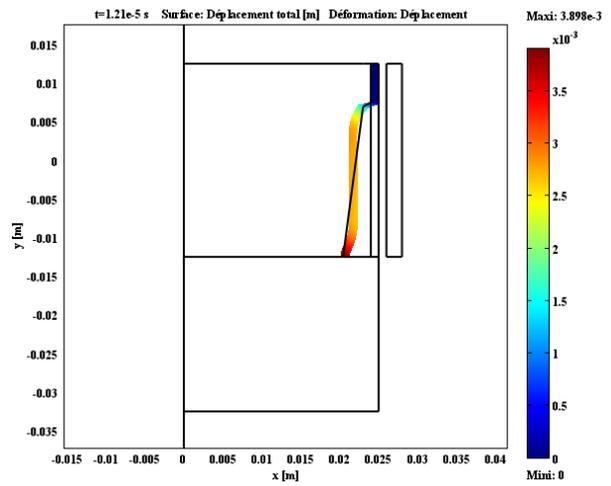
En analysant la vitesse d'impact du tube avec le boulon, cette dernière est fortement influencée par l'épaisseur du tube en mouvement. Cependant, l'effet de l'écart entre les deux pièces (l'offset) est insignifiant. Cela, est bien expliqué théoriquement (Figures III.34).

Tableau III.6 : Différents cas de paramètres géométriques

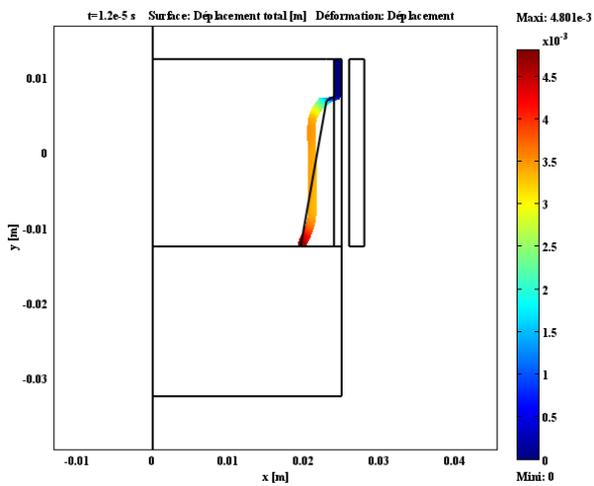
N°	Epaisseur du tube d [mm]	L'angle d'inclinaison α [°]	Offset [mm]
Cas 1	1	5	1
Cas 2		7,5	
Cas 3		10	
Cas 4		15	
Cas 5	1,5	5	1
Cas 6		7,5	
Cas 7		10	
Cas 8		15	
Cas 9	2	5	1
Cas 10		7,5	
Cas 11		10	
Cas 12		15	
Cas 13	3	5	1
Cas 14		7,5	
Cas 15		10	
Cas 16		15	
Cas 17	1	5	3
Cas 18		7,5	
Cas 19		10	
Cas 20		15	
Cas 21	1,5	5	3
Cas 22		7,5	
Cas 23		10	
Cas 24		15	
Cas 25	2	5	3
Cas 26		7,5	
Cas 27		10	
Cas 28		15	
Cas 29	3	5	3
Cas 30		7,5	
Cas 31		10	
Cas 32		15	



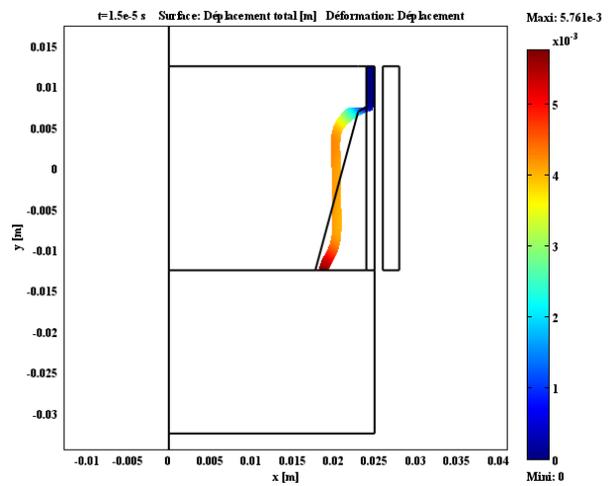
Cas 1 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$ Offset=1mm



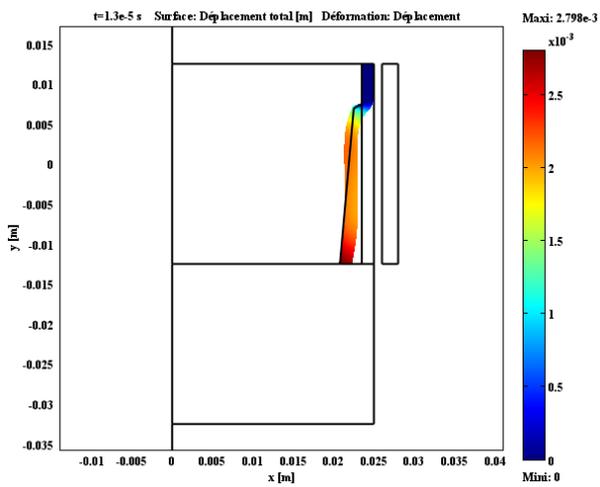
Cas 2 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=1mm



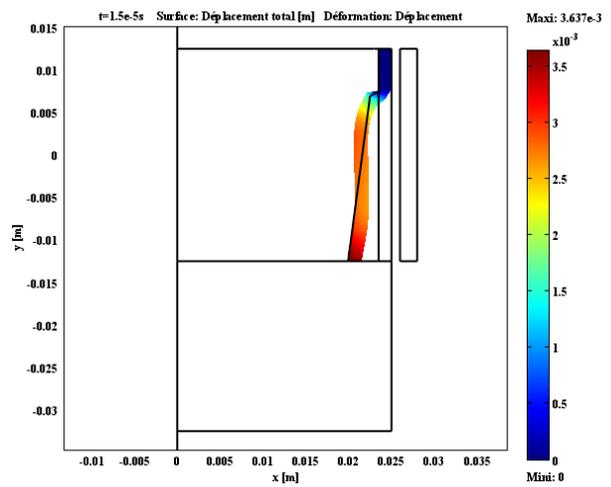
Cas 3 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=10^\circ$ Offset=1mm



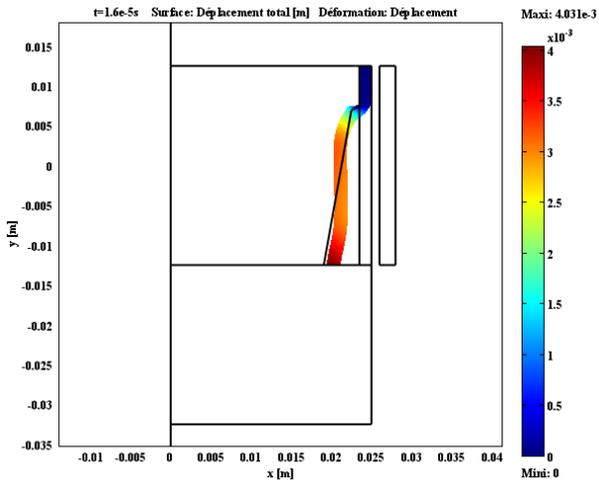
Cas 4 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=15^\circ$ Offset=1mm



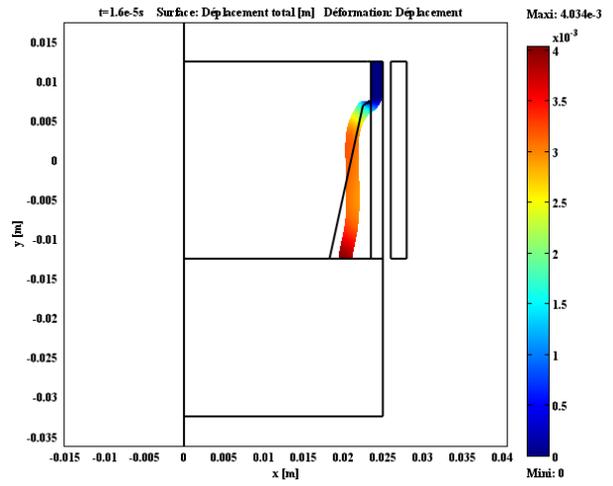
Cas 5 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$ Offset=1mm



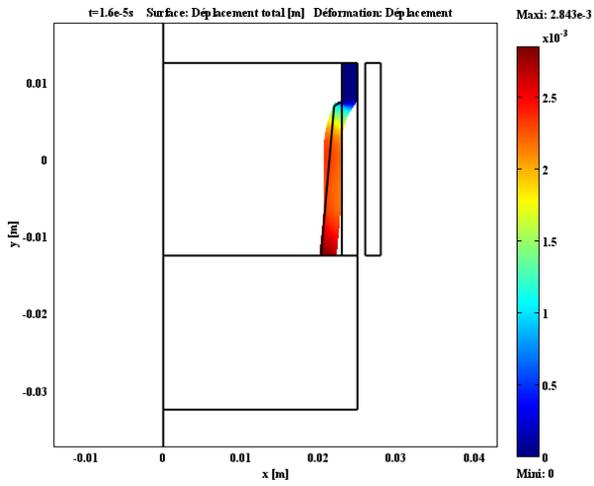
Cas 6 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=1mm



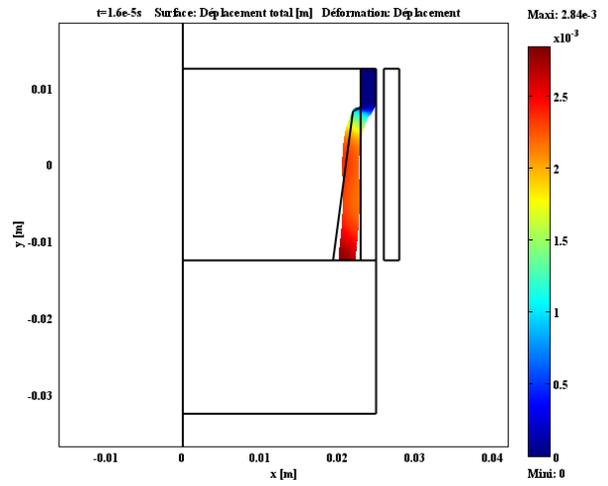
Cas 7 : d=1,5mm $\alpha=10^\circ$ Offset=1mm



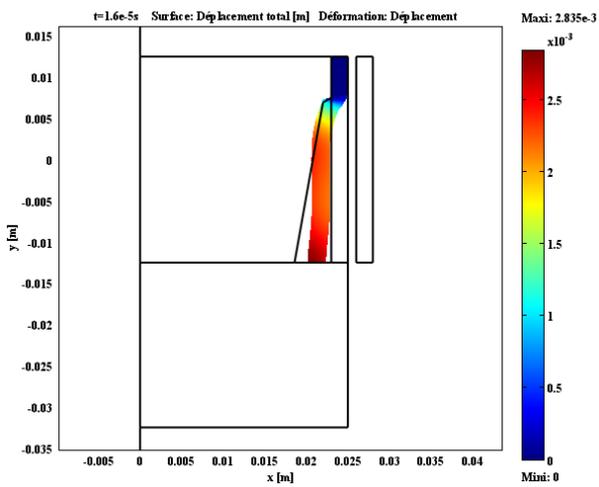
Cas 8 : d=1,5mm $\alpha=15^\circ$ Offset=1mm



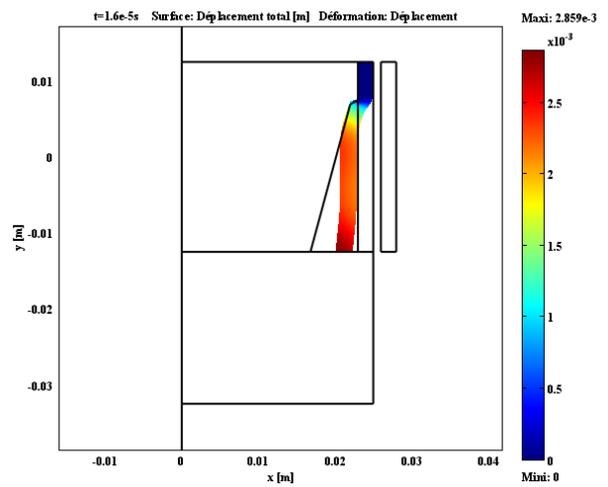
Cas 9 : d=2mm $\alpha=5^\circ$ Offset=1mm



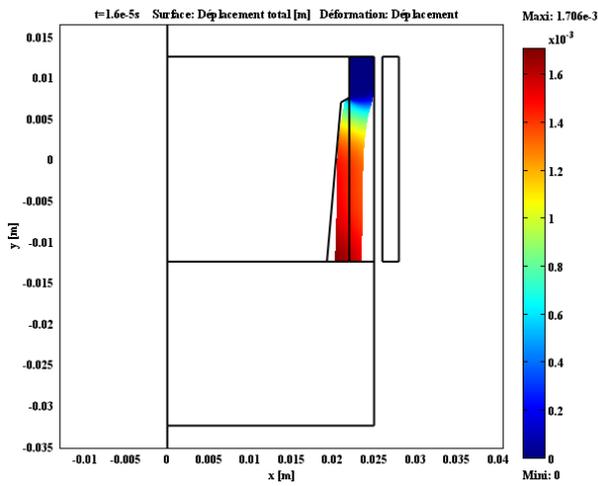
Cas 10 : d=2mm $\alpha=7,5^\circ$ Offset=1mm



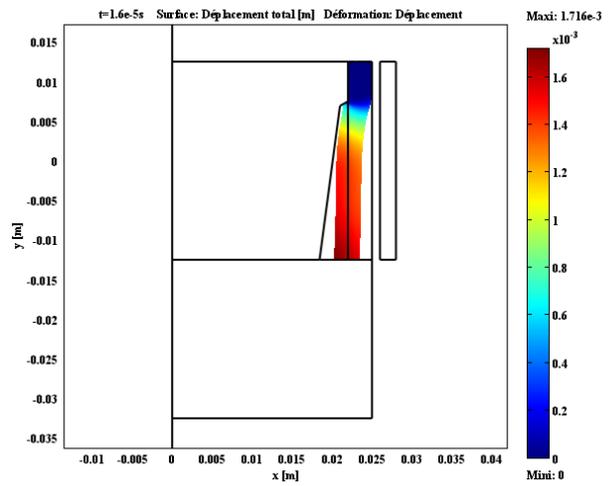
Cas 11 : d=2mm $\alpha=10^\circ$ Offset=1mm



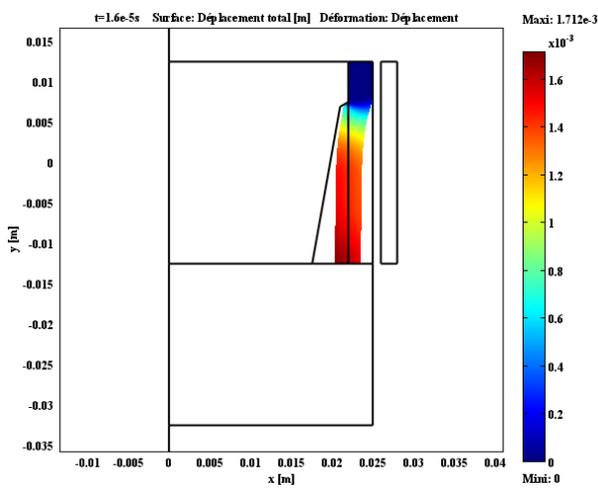
Cas 12 : d=2mm $\alpha=15^\circ$ Offset=1mm



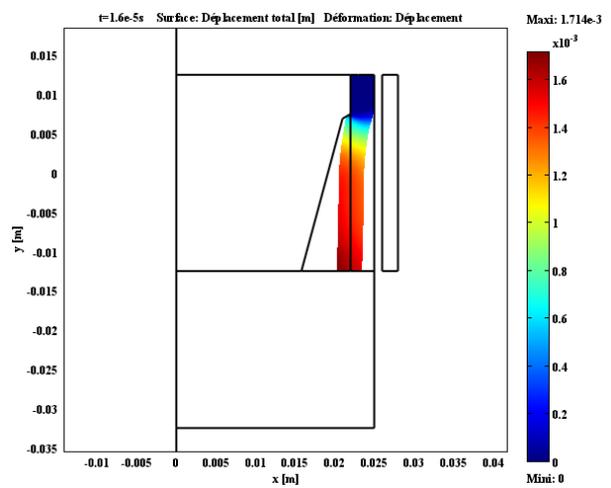
Cas 13 : $d=3mm$ $\alpha=5^\circ$ Offset=1mm



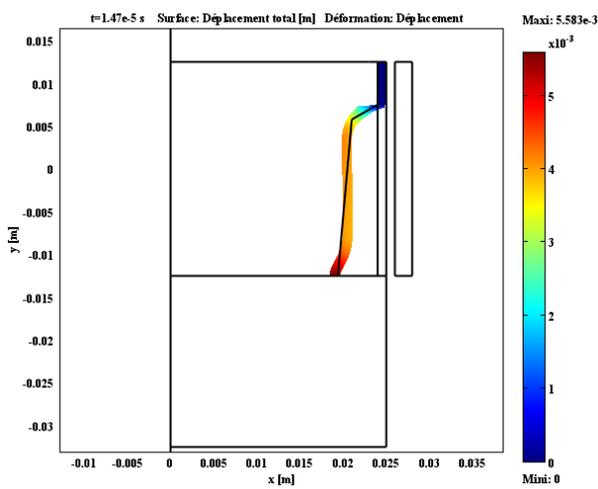
Cas 14 : $d=3mm$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=1mm



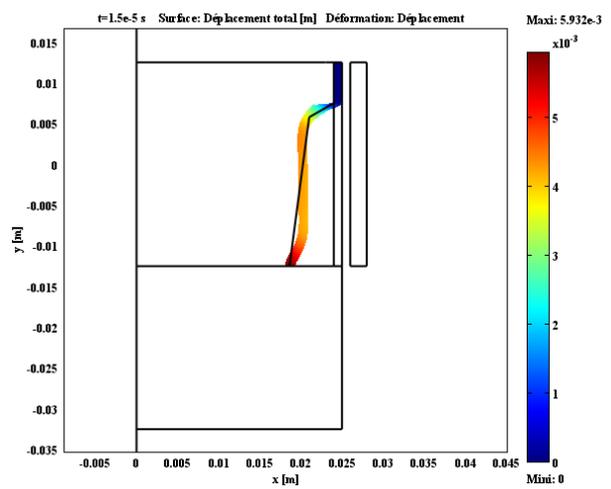
Cas 15 : $d=3mm$ $\alpha=10^\circ$ Offset=1mm



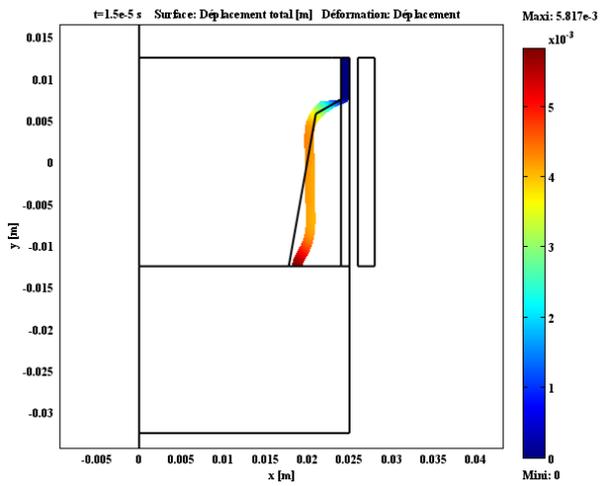
Cas 16 : $d=3mm$ $\alpha=15^\circ$ Offset=1mm



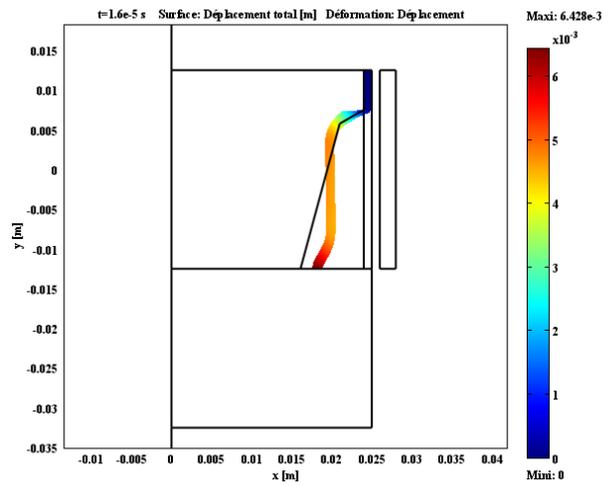
Cas 17 : $d=1mm$ $\alpha=5^\circ$ Offset=3mm



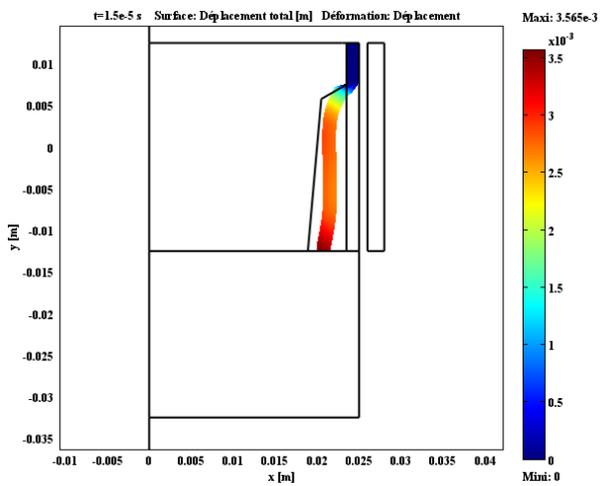
Cas 18 : $d=1mm$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=3mm



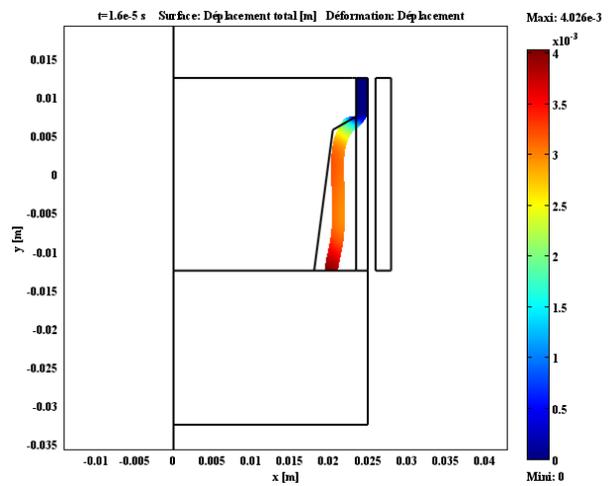
Cas 19 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=10^\circ$ Offset=3mm



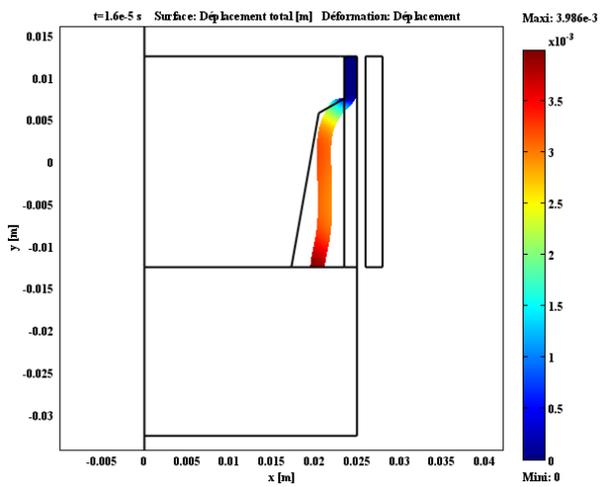
Cas 20 : $d=1\text{mm}$ $\alpha=15^\circ$ Offset=3mm



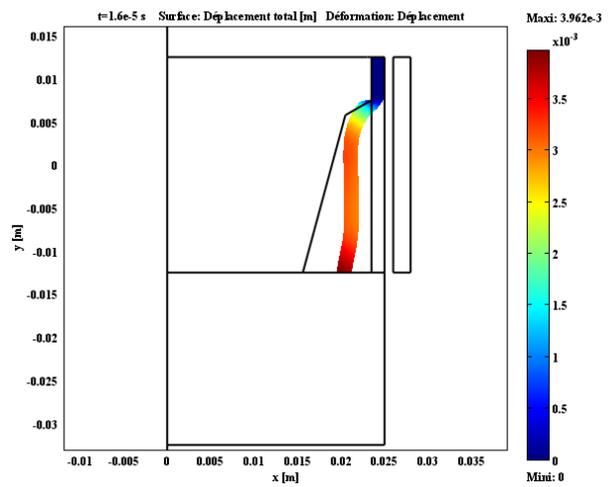
Cas 21 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$ Offset=3mm



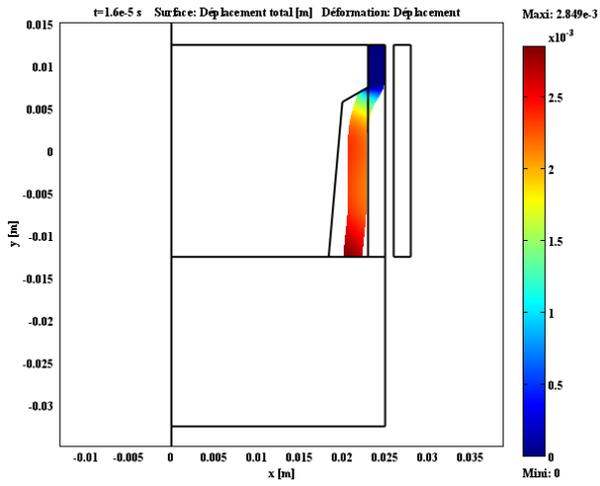
Cas 22 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=3mm



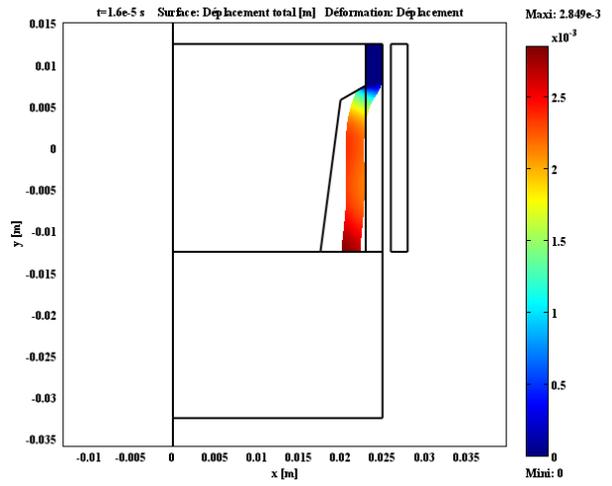
Cas 23 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=10^\circ$ Offset=3mm



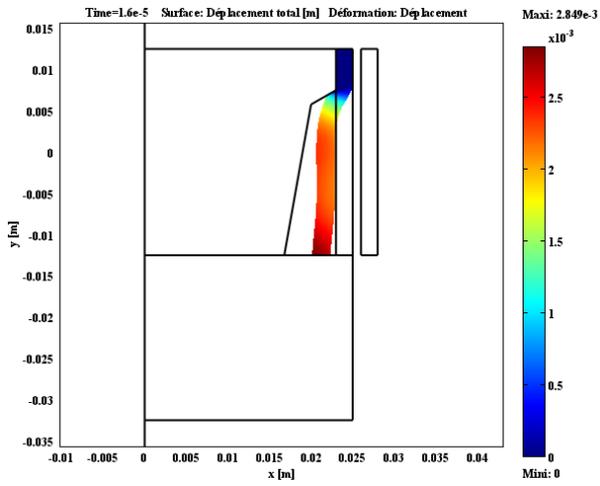
Cas 24 : $d=1,5\text{mm}$ $\alpha=15^\circ$ Offset=3mm



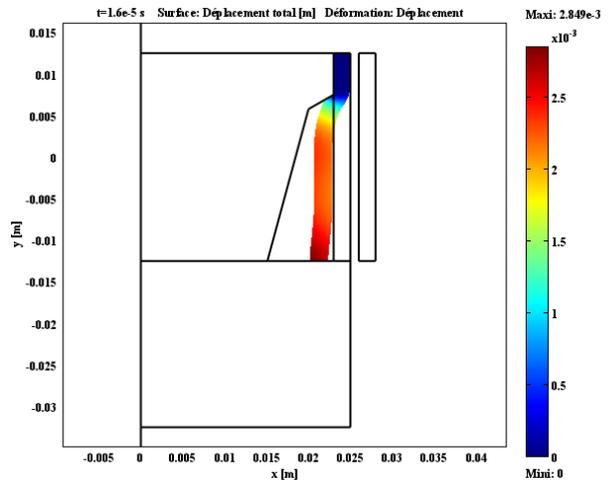
Cas 25 : $d=2\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$ Offset=3mm



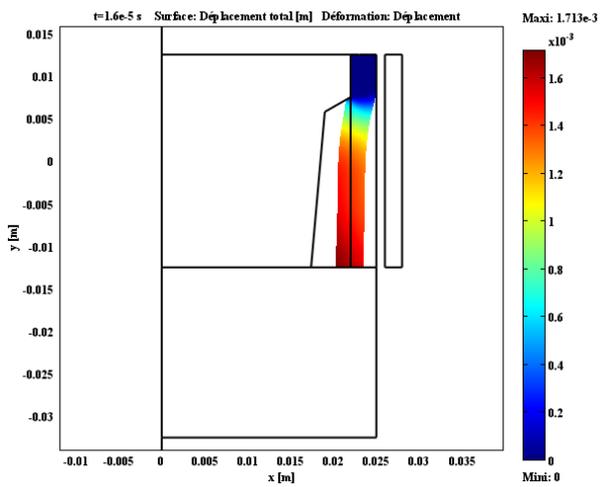
Cas 26 : $d=2\text{mm}$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=3mm



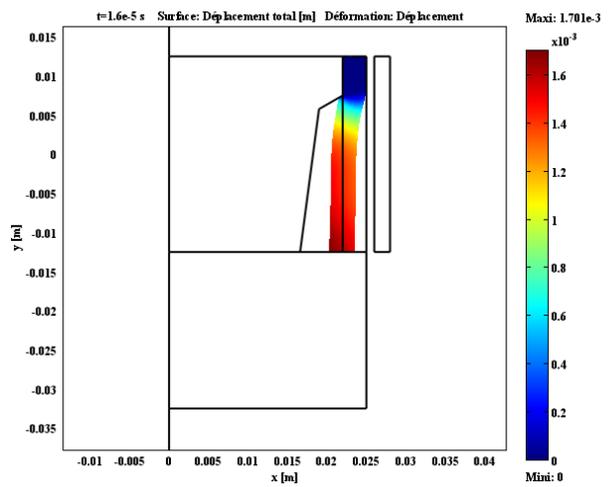
Cas 27 : $d=2\text{mm}$ $\alpha=10^\circ$ Offset=3mm



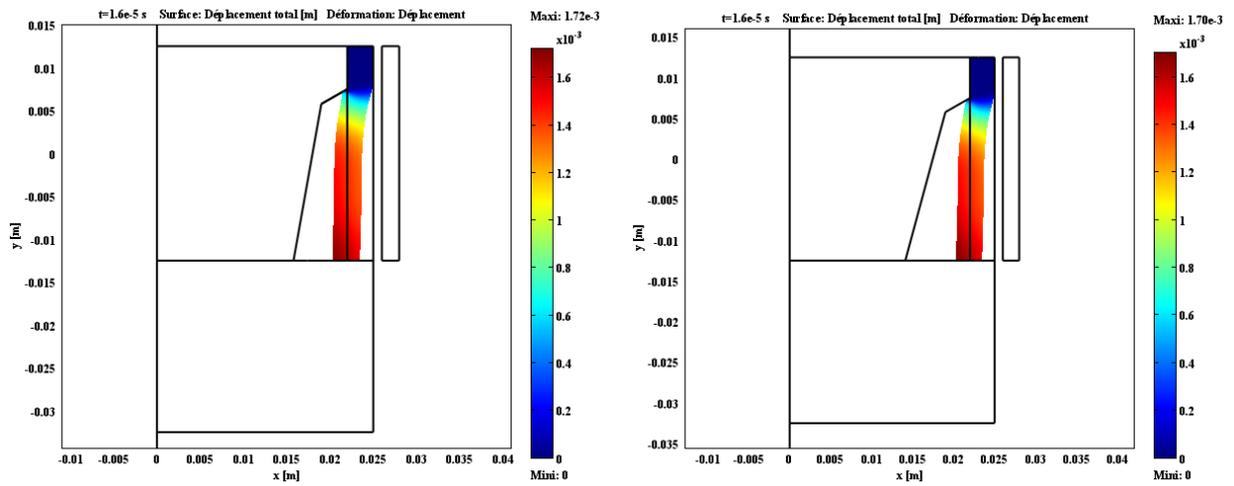
Cas 28 : $d=2\text{mm}$ $\alpha=15^\circ$ Offset=3mm



Cas 29 : $d=3\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$ Offset=3mm



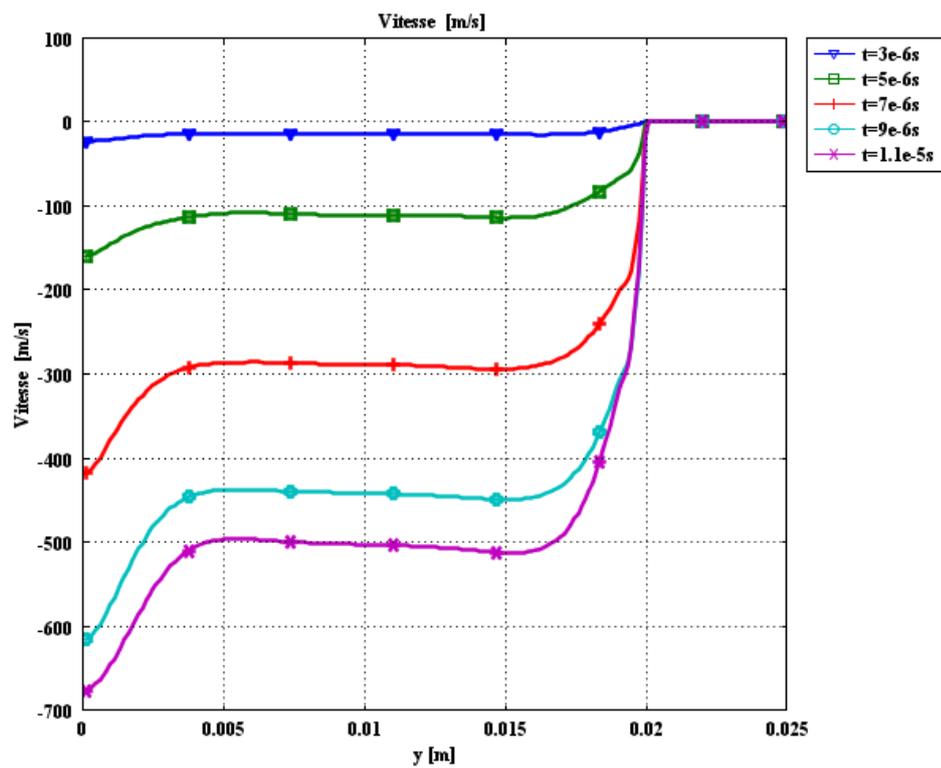
Cas 30 : $d=3\text{mm}$ $\alpha=7,5^\circ$ Offset=3mm



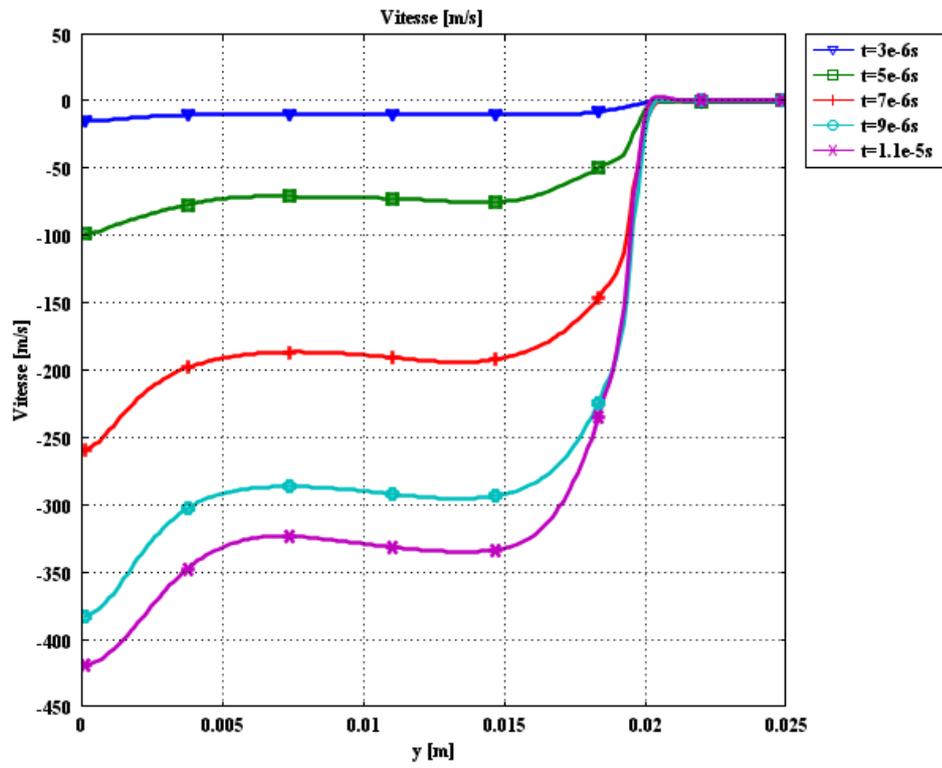
Cas 31 : $d=3\text{mm}$ $\alpha=10^\circ$ Offset=3mm

Cas 32 : $d=3\text{mm}$ $\alpha=15^\circ$ Offset=3mm

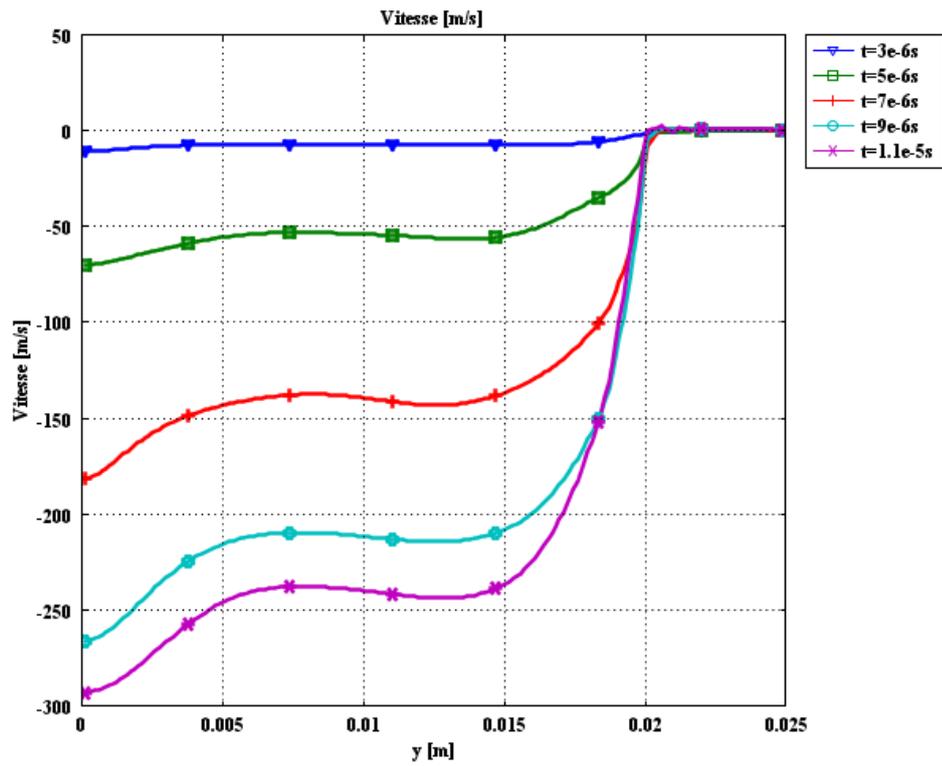
Figure III.33: Différents cas d'assemblages



$d=1\text{mm}$ $\alpha=5^\circ$



$d=1.5mm \alpha=7.5^\circ$



$d=2mm \alpha=10^\circ$

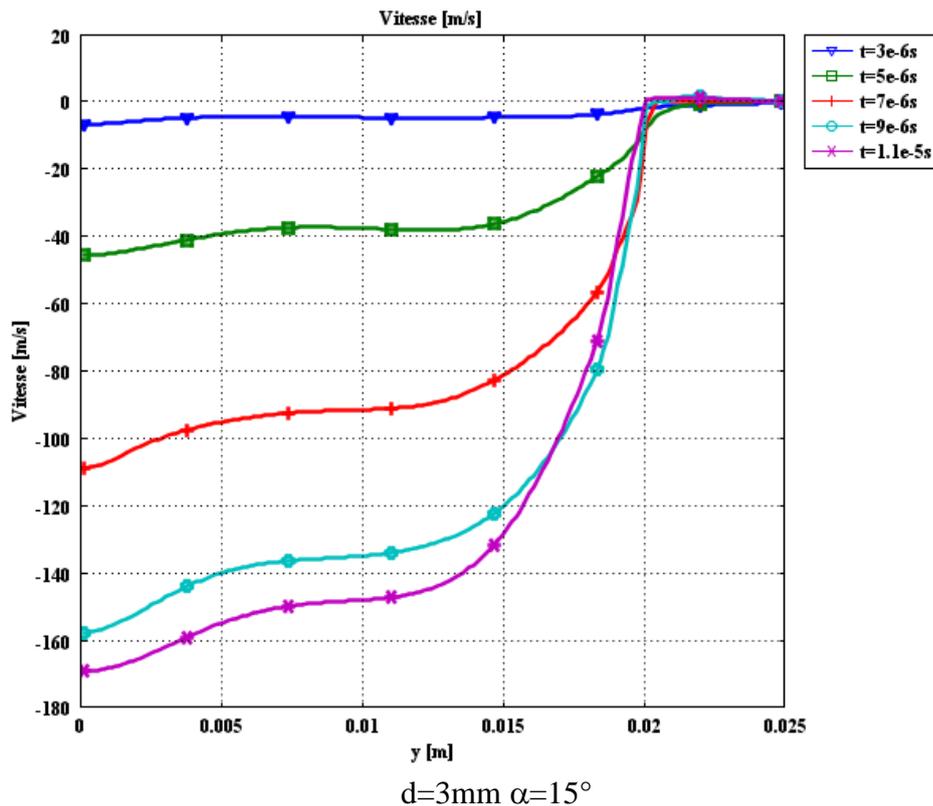


Figure III.34: Vitesse d'impact pour certains cas d'assemblages

III.4.3. Analyse de l'effet des paramètres géométriques

Afin d'identifier les paramètres de processus qui régissent le développement de l'assemblage par impulsion magnétique d'un tube avec un boulon intérieur, différents cas ont été simulés.

L'épaisseur du tube en déplacement, l'offset entre le tube et le boulon et l'angle d'impact ont été identifiés comme des paramètres importants pour l'assemblage magnétique de cette installation.

Les courbes de la figure III.35, donnant les longueurs d'assemblage en fonction des épaisseurs de paroi des tubes extérieurs, pour un décalage de 1mm, montrent une relation directe entre ce paramètre (épaisseur du tube) et la longueur de l'assemblage du tube avec le boulon interne.

En effet, théoriquement, la longueur d'assemblage diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi du tube. Comme la puissance du générateur considérée est constante pour toutes les expériences, une épaisseur du tube plus grande entraîne une pression de contact plus faible entre le tube et le boulon car dans ce cas, la compression du tube nécessite plus d'énergie et son inertie est plus élevée. Cela, montre la nécessité d'augmenter l'énergie pour l'assemblage de tubes avec des épaisseurs plus importantes.

Cependant, l'angle de la section conique, qui détermine l'angle de contact du tube avec le boulon interne, présente une influence plus faible sur la longueur de l'assemblage résultante (figure III.35).

D'autre part, Il est à noter que les cas avec un décalage de 3 mm n'ont pas abouti à un assemblage significatif, que pour un tube de faible épaisseur (1mm), quel que soit l'angle

d'inclinaison α , tandis qu'une épaisseur de paroi de 3 mm et un décalage de 3 mm n'a pas induit d'assemblage dans aucune variation de l'angle α (figure III.36).

Tous ces résultats numériques se rapprochent des résultats expérimentaux [52]. Néanmoins, les différences remarquées sont dues au courant de décharge considéré dans la simulation, puisque le générateur utilisé dans les travaux expérimentaux n'est pas connu.

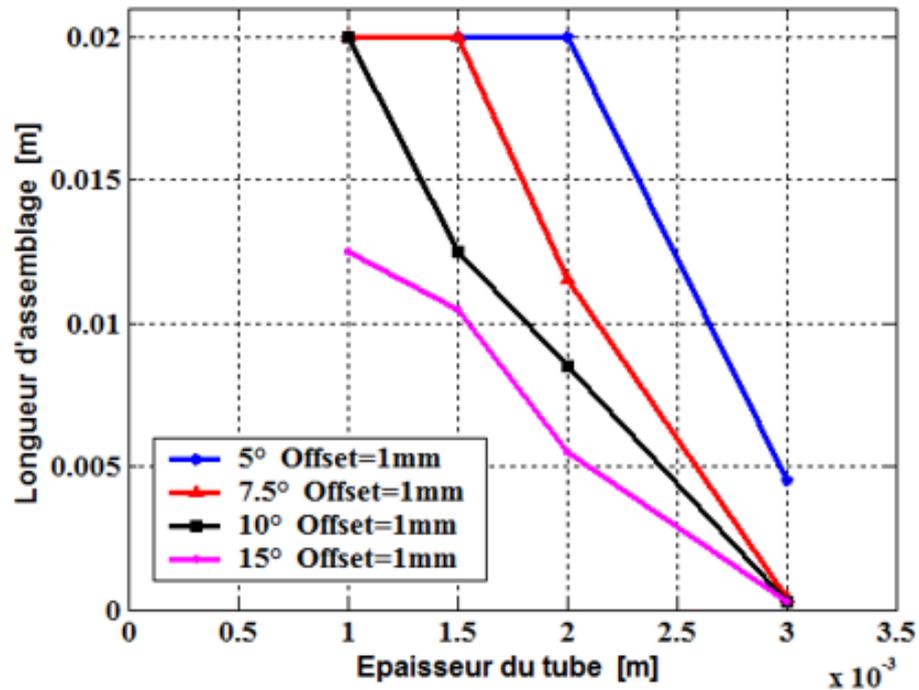


Figure III.35: Longueur d'assemblage en fonction de l'épaisseur du tube pour un offset de 1mm

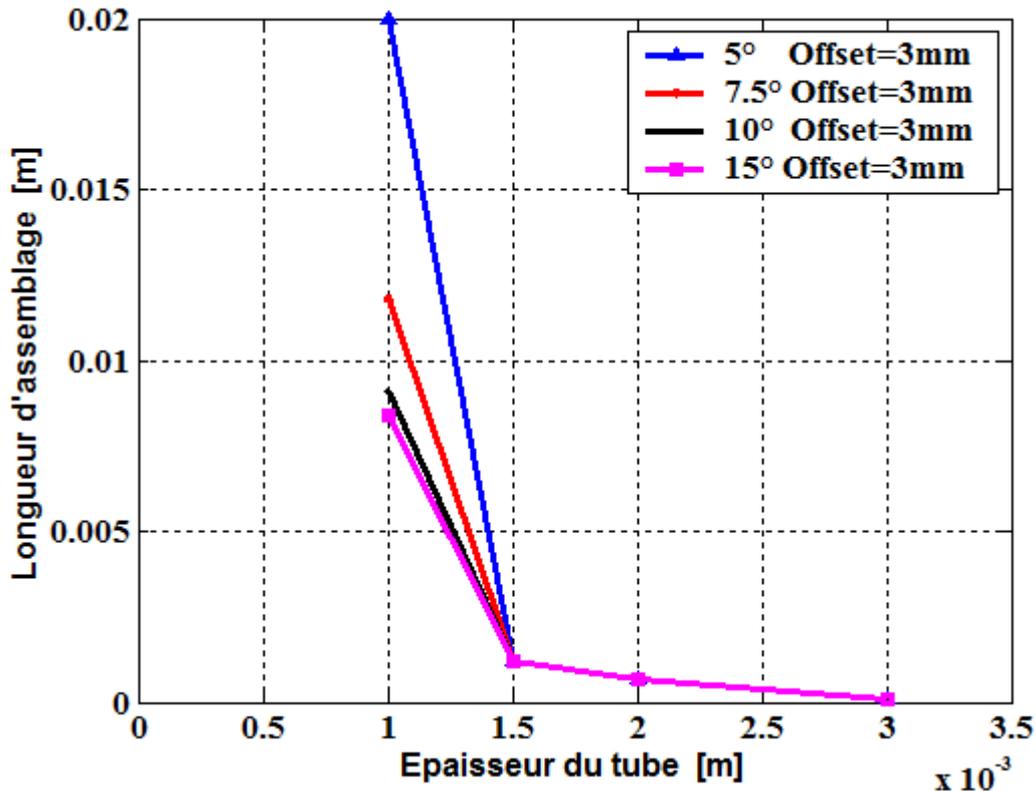


Figure III.36: Longueur d'assemblage en fonction de l'épaisseur du tube – offset= 3mm

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, les différents résultats numériques ont été présentés et interprétés.

En effet, l'outil numérique, sous environnement COMSOL MULTIPHYSICS, couplant les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques a été utilisé pour la simulation de différentes applications expérimentales et industrielles, permettant l'étude et l'analyse du processus d'assemblage par impulsion magnétique, pour différents cas : assemblage de plaques, de tubes, similaire et dissimilaire.

D'autre part, des études paramétriques, ont mis en évidence l'effet des paramètres géométriques et physiques sur la faisabilité et la caractérisation du processus d'assemblage magnétique.

Tous les résultats numériques obtenus ont été validés par ceux trouvés expérimentalement dans les travaux antérieurs.

Chapitre IV

Contribution à la modélisation 3D de l'assemblage magnétique

Chapitre IV Contribution à la modélisation 3D de l'assemblage magnétique

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques applications simulées en tridimensionnel.

En effet, plusieurs installations industrielles, destinées à l'assemblage magnétique, présentent des géométries assez complexes et ne peuvent être simulées en bidimensionnel.

Pour cela, nous avons essayé d'aborder la modélisation en 3D de certains systèmes, pas très compliqués, d'assemblage magnétique, toujours sous environnement COMSOL.

Néanmoins, le modèle numérique développé en 3D nécessite plus d'espace mémoire et plus de temps de calcul. Il couple les phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques.

IV.2.Assemblage de plaques plates

Cette application concerne l'assemblage de deux plaques planes parallèles, en Aluminium, de même dimension (50mm x 50mm x 1mm) et distantes de 4 mm.

L'une des plaques est mobile se déformant pour s'assembler avec l'autre plaque fixe, sous l'effet des forces électromagnétiques générées par le courant impulsif, qui parcourt un inducteur, en cuivre, de 20mm de diamètre, sous forme de disque et situé sous la plaque mobile à une distance de 1mm (Figure IV.1).

Le courant de décharge utilisé est de forme sinusoïdale amortie (Figure IV.2):

$$J_{ext} = 7.4 e^{11} * \exp(-6374.8 * t) * \sin(1.118e^5 * t) \quad (IV.1)$$

Les résultats numériques de ce modèle 3D, montrent que les deux plaques, en Aluminium, se heurtent au bout de 28,25µs. De plus, la forme de l'assemblage est bien prévisible, selon la forme de la bobine considérée (Figure IV.3).

D'autre part, nous pouvons remarquer que l'assemblage des deux plaques est plus accentué à l'instant 28,7µs, la largeur d'assemblage devient plus importante (Tableau IV.2).

En effet, à l'instant 28,25µs, les plaques présentent un assemblage par pointe, la largeur assemblée n'atteint pas 3mm, puis cette largeur augmente jusqu'à atteindre 7mm en une durée de moins de 0,5µs (FigureIV.4).

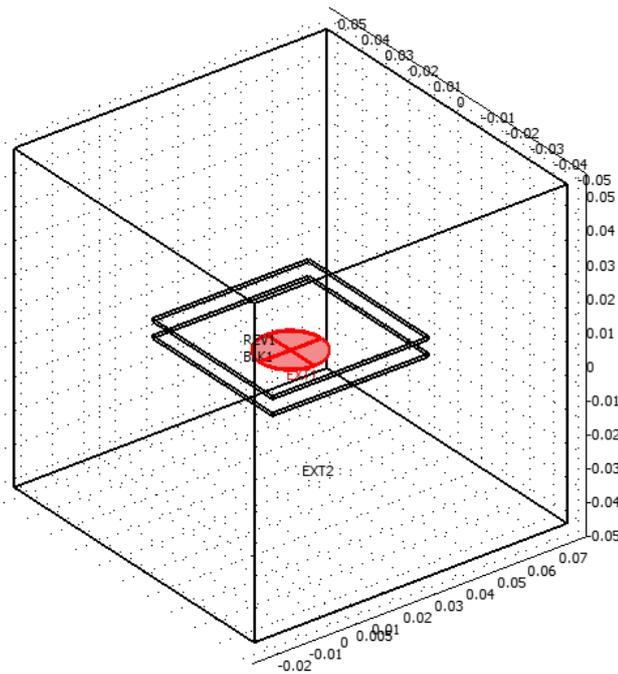


Figure IV.1: Système 3D d'assemblage de plaques

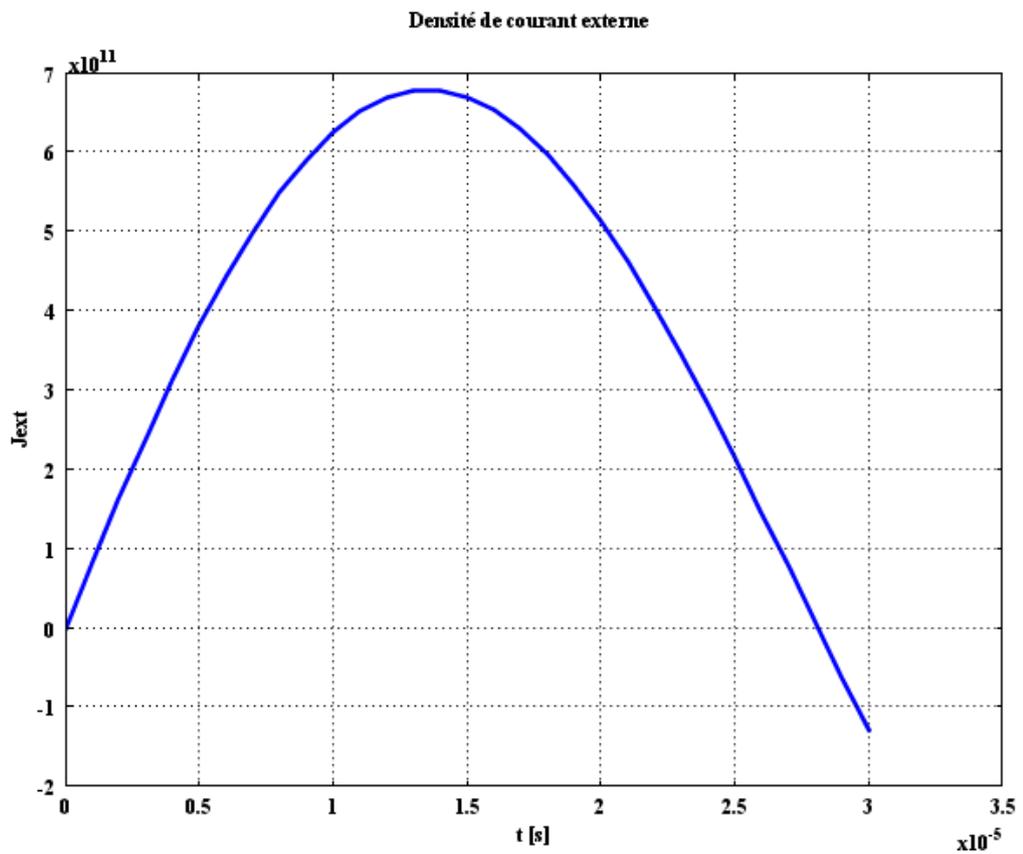


Figure IV.2: Densité de courant externe

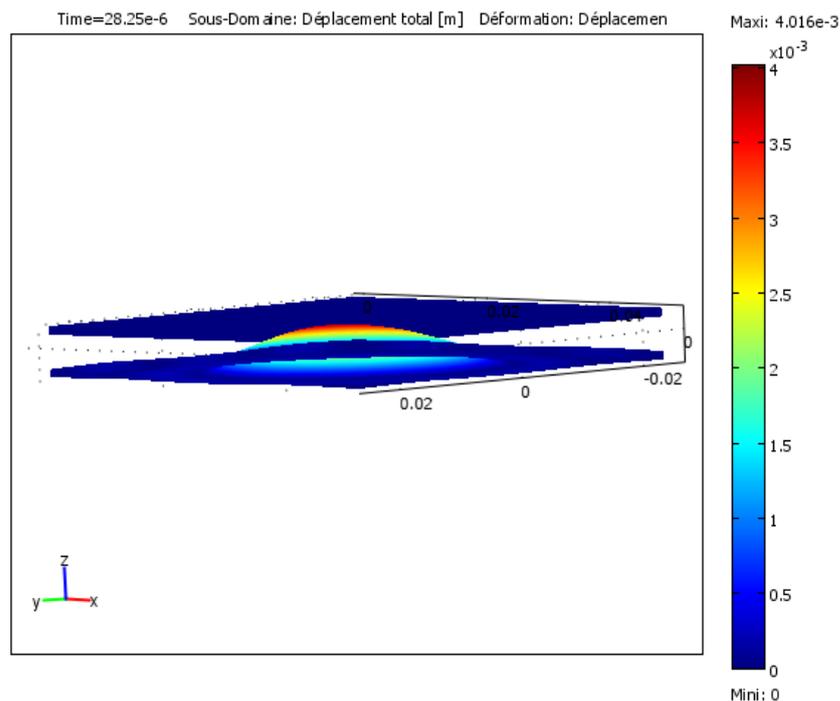
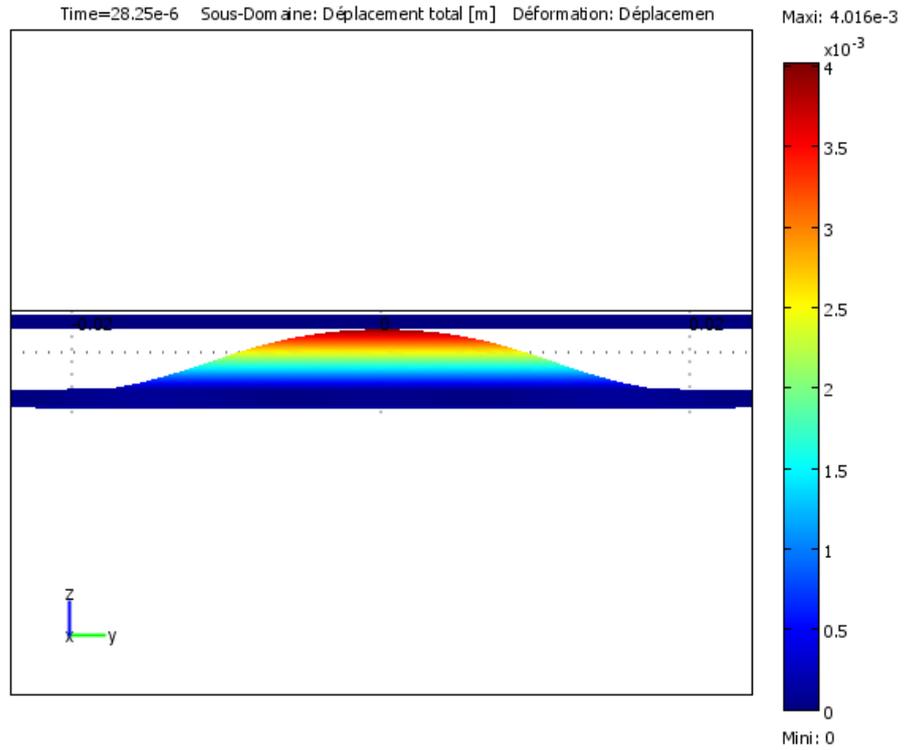
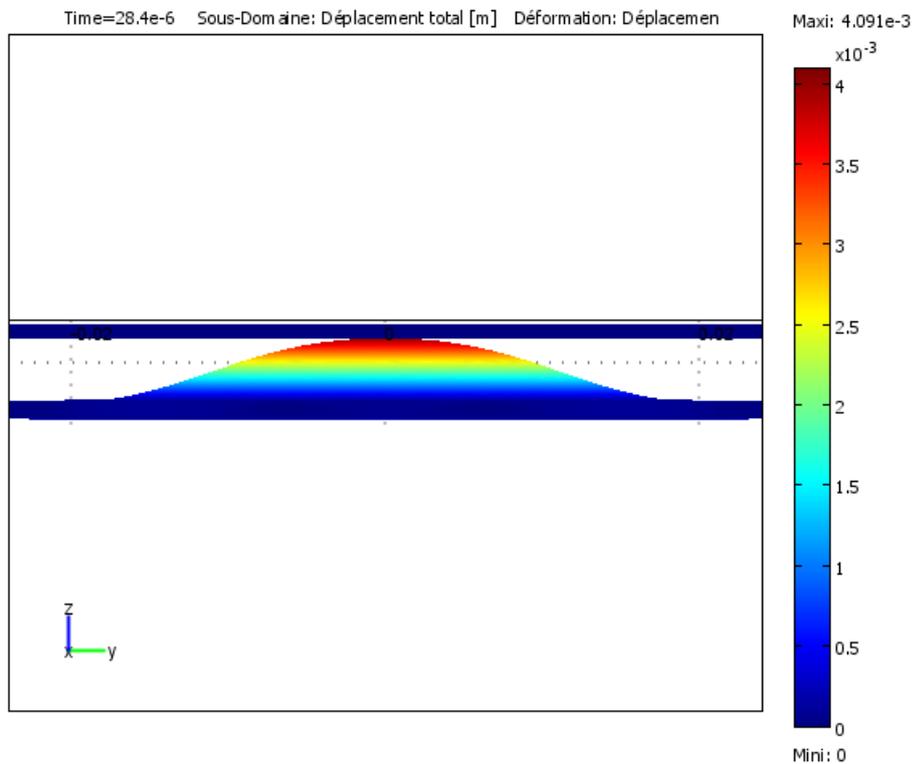
Figure IV.3: Assemblage des plaques à $t=28,25\mu\text{s}$

Tableau IV.1 : Caractéristiques des assemblages à différents instants

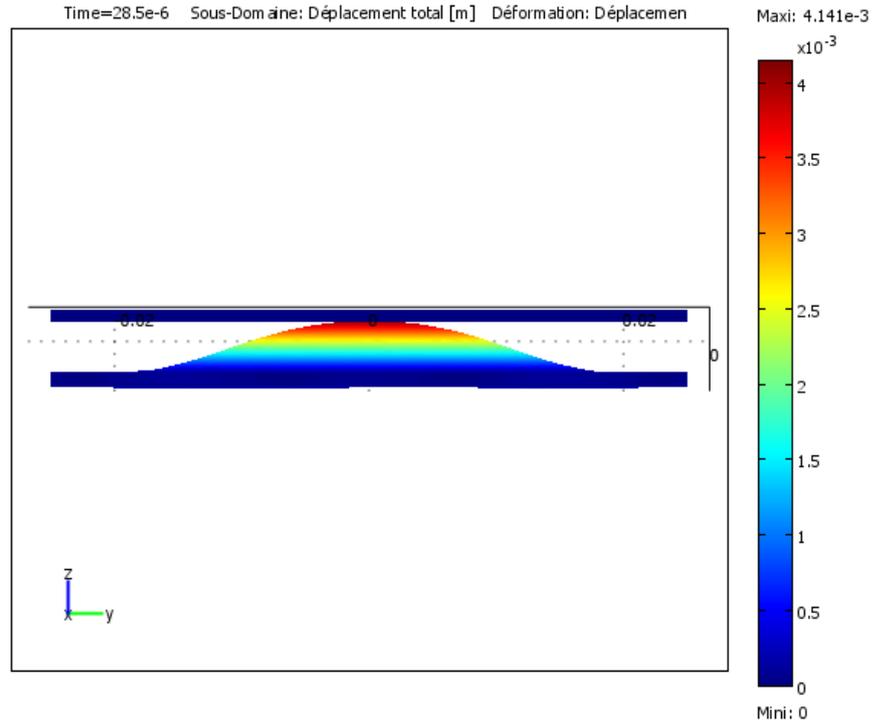
tmax [μs]	Largeur de l'assemblage [mm]	Angle de l'assemblage [$^\circ$]
28,25	2,4	9,5
28,4	4,6	8,4
28,5	5,8	8,13
28,7	7,2	8



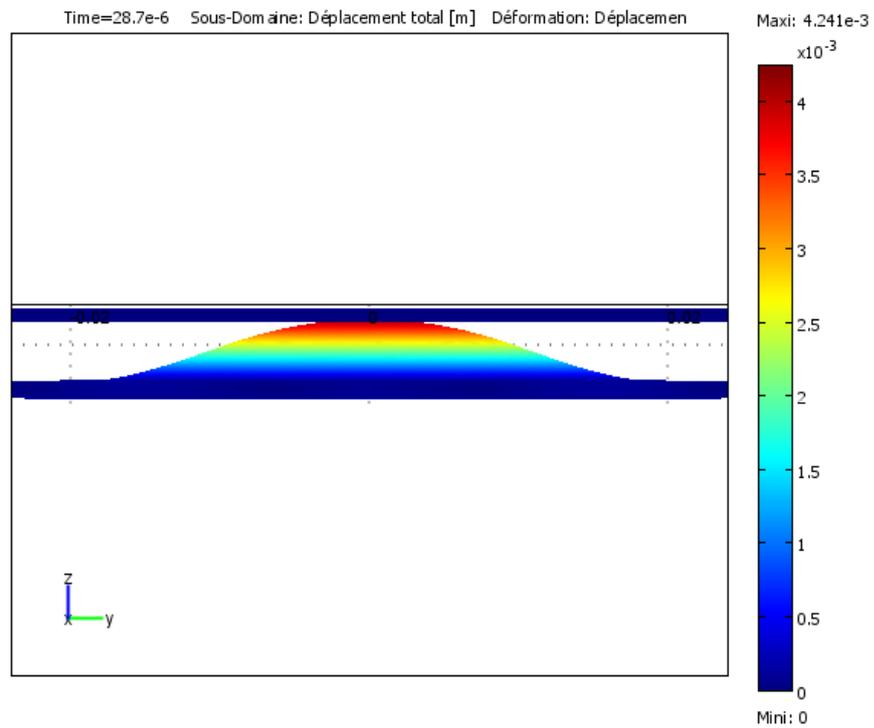
(a) : tmax=28.25 μ s



(b): tmax=28.4 μ s



(c): tmax=28.5 μ s



(d): tmax=28.7 μ s

Figure IV.4: La largeur d'assemblage des plaques

IV.3. Assemblage des tubes par expansion

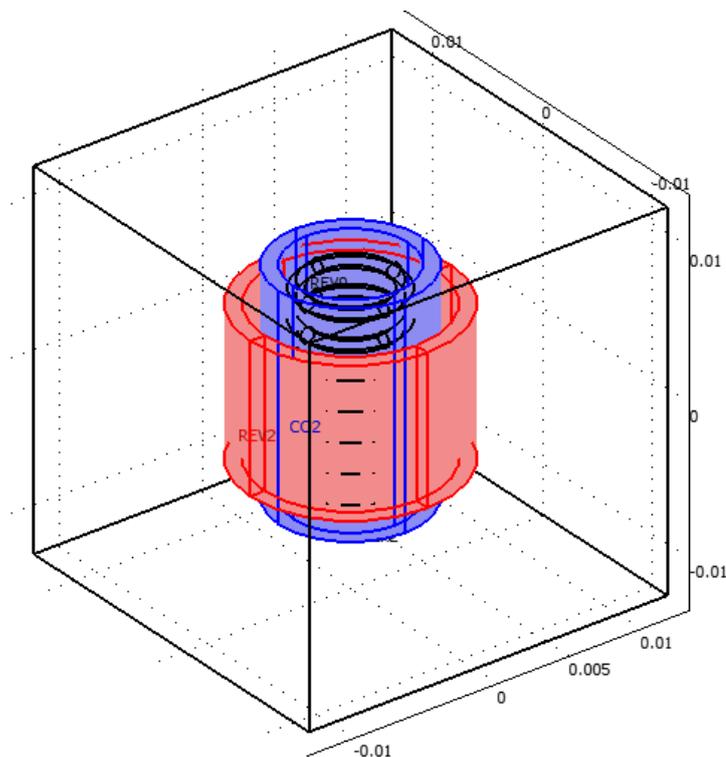
Cette application concerne une installation, qui permet l'assemblage de deux tubes en Aluminium, par expansion du tube intérieur, à l'aide d'un inducteur spiral à sept spires (Figure IV.5).

Le système géométrique comporte un cylindre intérieur de 10mm de diamètre et de hauteur 15mm, distant de 1mm du tube extérieur. qui est de hauteur 10mm. La bobine est de diamètre extérieur 8mm et de hauteur 13mm. L'épaisseur de toutes les pièces est fixée à 1mm.

Le courant impulsionnel (Figure IV .6), considéré pour dans cette application est donné par l'équation suivante :

$$J_{ext} = 3e11 * \exp(-6374.8 * t) * \sin(1.118e5 * t) \quad (IV.2)$$

Au bout de 18 μ s, les deux tubes sont bien assemblés au niveau de la partie, face à la bobine, où les forces électromagnétiques sont importantes.



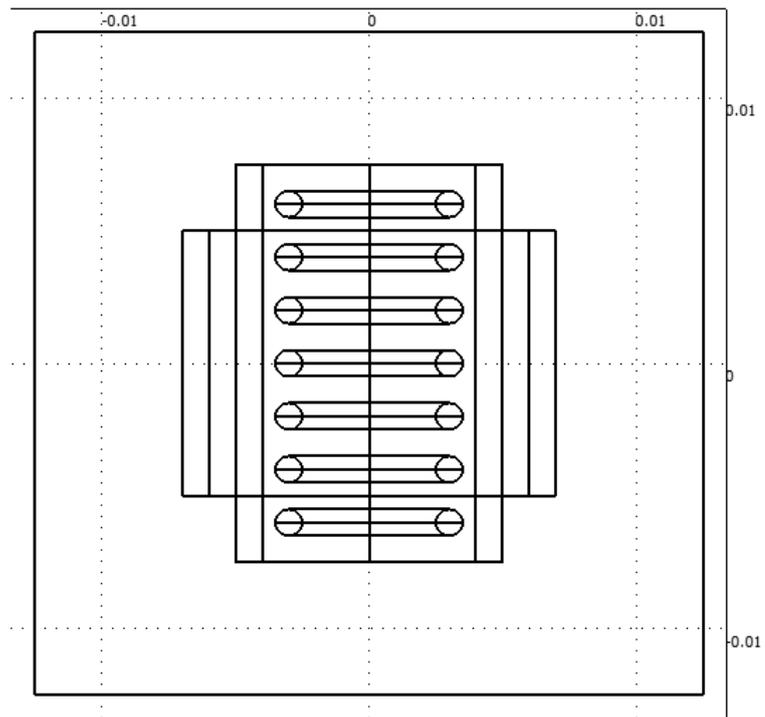


Figure IV.5: Le système d'assemblage des tubes par expansion 3D

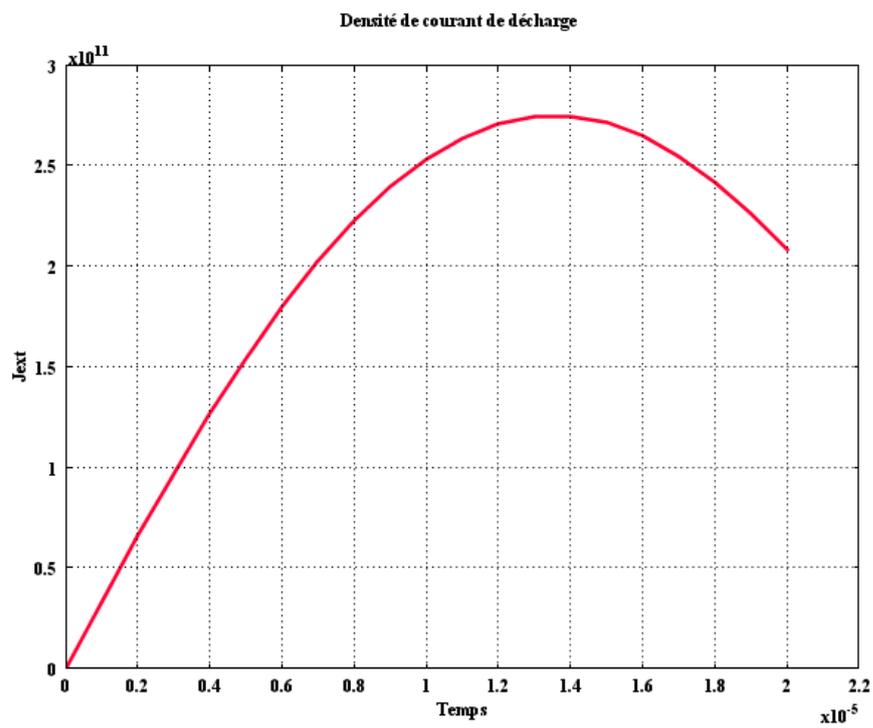


Figure IV.6: Courant externe appliqué à la bobine

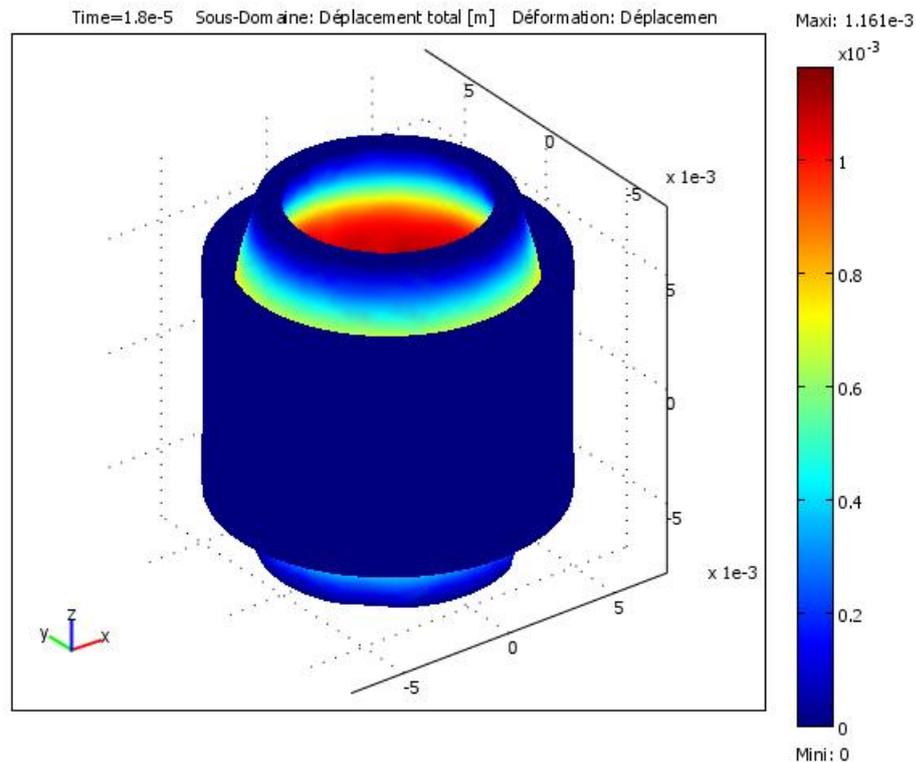


Figure IV.7: Assemblage des tubes par expansion

IV.4.Assemblage de tubes par compression

Une autre application d'assemblage en tridimensionnel est celle de la compression d'un tube extérieur sur un autre tube intérieur.

L'installation simulée, comporte une bobine à trois spires de hauteur 5mm, entourant deux tubes concentriques, de hauteur 15mm et 20mm et de diamètres 10mm et 6mm, respectivement le tube mobile et le tube intérieur (Figure IV.8).

Sous l'effet des forces électromagnétiques de compression, le tube extérieur se déforme pour s'assembler avec le tube intérieur, au niveau de la région centrale entourée par la bobine de compression (Figure IV. 9), après application de l'impulsion magnétique pendant environ 15 μ s.

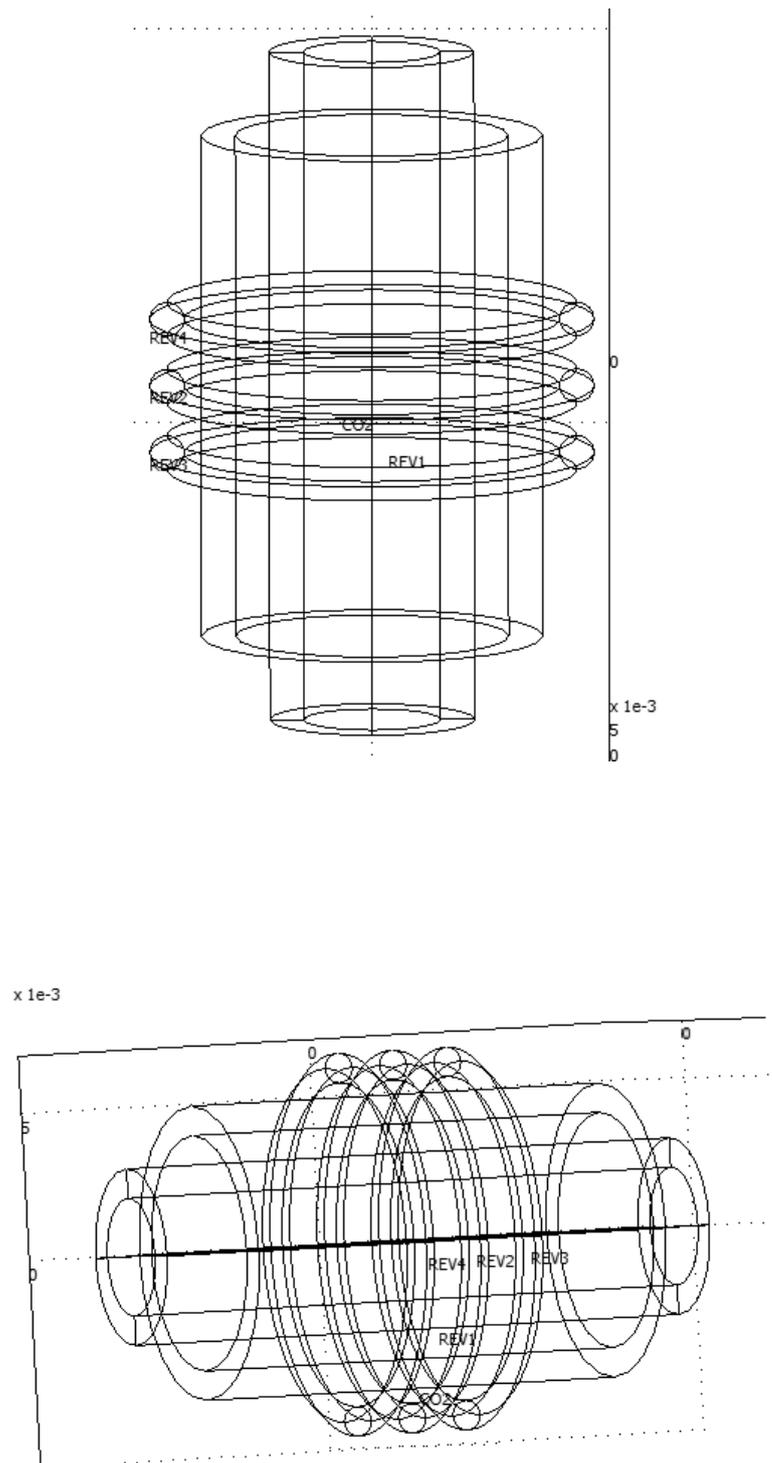
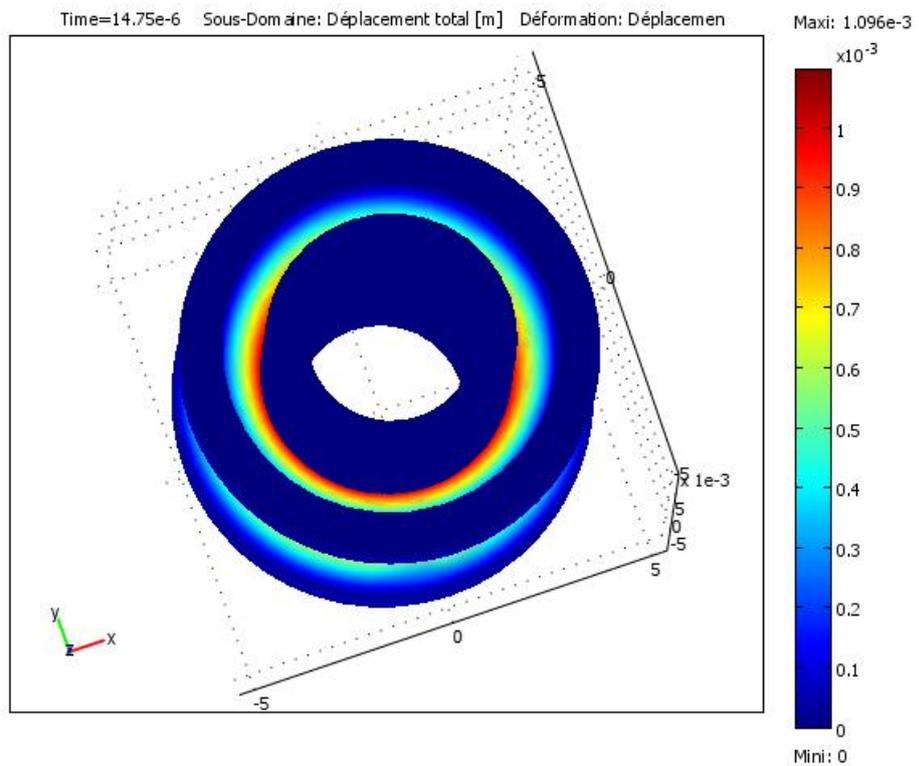
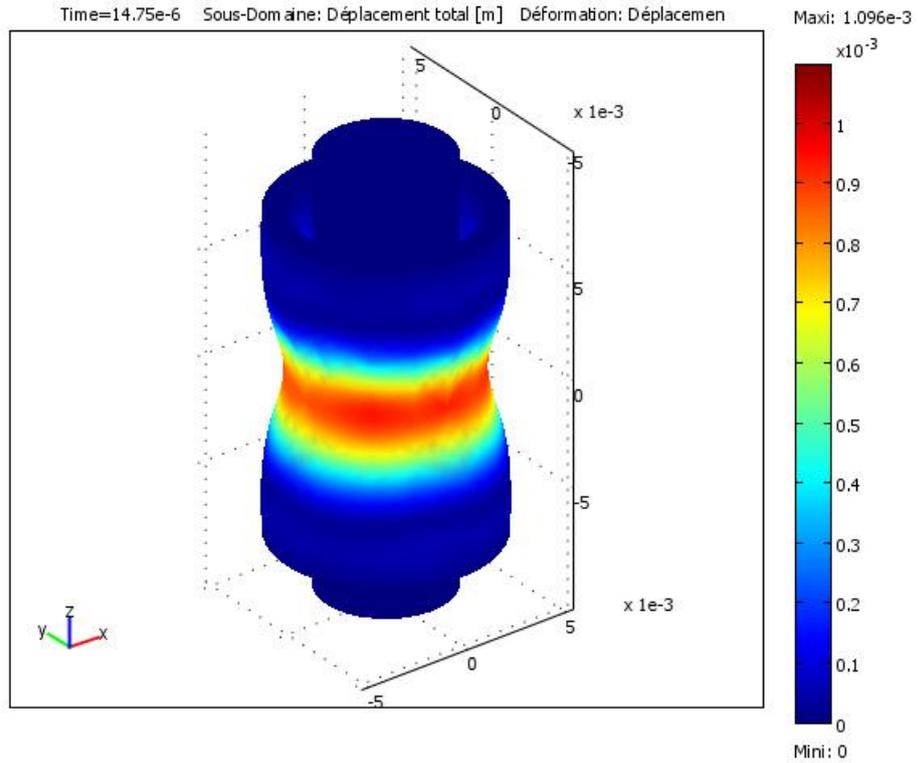


Figure IV.8: Géométrie de l'assemblage des tubes par compression



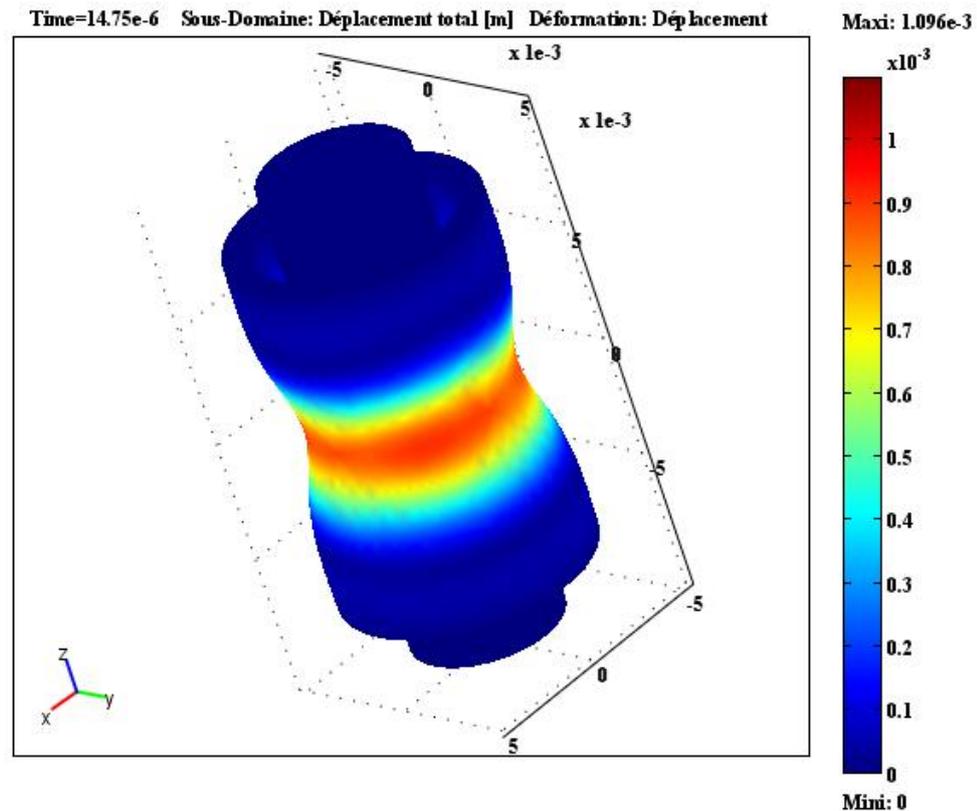


Figure IV.9: Assemblage des tubes par compression

IV.5.Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons essayé d'aborder la modélisation tridimensionnelle des systèmes d'assemblage par impulsion.

Les résultats numériques obtenus sont prévisibles théoriquement, pour les trois applications simulées.

Nous espérons que cette contribution sera un premier pas dans la modélisation des systèmes industriels de géométries beaucoup plus complexes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les technologies d'assemblage et de soudage à haute vitesse, comme l'assemblage par impulsion magnétique sont importantes car elles peuvent être facilement appliquées dans des environnements de fabrication typiques et offrent donc de nouvelles perspectives pour l'assemblage de matériaux différentes natures.

L'objectif du travail effectué et présenté dans ce mémoire est la modélisation mathématique et numérique de l'assemblage de pièces industrielles par impulsion magnétique.

En effet, un modèle numérique couplant aussi bien les phénomènes électromagnétiques, les phénomènes mécaniques que les phénomènes thermiques, a été développé sous environnement COMSOL MULTIPHYSICS. Ce modèle nous a permis d'étudier et d'analyser le processus d'assemblage par impulsion magnétique par la simulation de plusieurs applications pratiques et industrielles d'assemblage de plaques ou de tubes.

Des études paramétriques ont mis en évidence l'effet de certains paramètres géométriques et physiques sur ce procédé.

De plus, nous avons analysé les caractéristiques de l'assemblage magnétique, en particulier, la largeur assemblée, le temps d'assemblage et son angle.

Tous les résultats numériques obtenus sont bien validés par ceux trouvés expérimentalement et pratiquement.

Un modèle tridimensionnel a été développé, pour contribuer à la modélisation d'applications industrielles de géométrie complexes, non axisymétriques, ne pouvant pas être simulées en bidimensionnel.

En perspectives, nous proposons le perfectionnement de ce modèle numérique en améliorant la précision des résultats, soit par l'affinement des maillages considérés ou la considération de l'influence d'autres paramètres comme la mutuelle entre l'inducteur et les pièces, la forme des inducteurs utilisés et les matériaux considérés.

D'autre part, le modèle tridimensionnel pourrait être amélioré, dans le futur pour une meilleure simulation des applications industrielles beaucoup plus complexes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Bühler, H.; v. Finckenstein, E: Fügendurch, « Magnetumformung. Werkstatt und Betrieb 101 », Jahrgang 1968 Heft 1, pp. 209-215, 1968.
- [2] Bühler, H.; v. Finckenstein, E: Bemessen von Sickenverbindungen für ein Fügendurch, « Magnetumformung. Werkstatt und Betrieb 104 », Jahrgang 1971 Heft 1, pp. 45-51, 1971.
- [3] Belyy, I.V., Fertik, S.M.; Khimenko, L.T.: « Electromagnetic Metal Forming », Handbook. A Russian translation of the book "Spravochnik po Magnitno-impul'snoy Obrabotke Metallov". Translated by Altynova M.M., Material Science and Engineering Department., Ohio State University, chapter 4.5, 1996.
- [4] Daehn, G. S. et al. « Opportunities in High-Velocity Forming of Sheet Metal », Metalforming magazine, January, 1997.
- [5] Lide, D. R.: CRC Handbook of Chemistry and Physics: 87th Edition, B & T, 2006.
- [6] Winkler, R., « Hochgeschwindigkeitsumformung » « High-speed forming ». VEB Verlag Technik, Berlin, 1973.
- [7] Yamada T., Kani K., Sakuma K. & Yubisui, A. « Experimental Study on the Mechanics of Springback in High Speed Sheet Metal Forming », Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Vol.45, No.397 pp. 1046-1054, 1981.
- [8] Kojima, M.; Tamaki, K.; Masumoto, I. « Electromagnetic welding of aluminium tube to aluminium or dissimilar metal cores » (Study on electromagnetic welding, report 1), Transactions of the Japan welding society, Vol. 16, No.2, 1985.
- [9] Kojima, M.; Tamaki, K.; Furata, T. « Factors affecting the result of electromagnetic welding of Aluminium tube » (Study on electromagnetic welding, report 2), Transactions of the Japan welding society, Vol. 19, No.1, 1988.
- [10] V. TORTEL, « Conception d'un générateur d'impulsion d'un kJ pour le magnétoformage », thèse doctorat de l'université des sciences et techniques de Lille Flandres Artois, 15 Jan 1993.
- [11] Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai, « High-Speed Deformation and Collision Behavior of Pure Aluminum Plates in Magnetic Pulse Welding », Materials Transactions, Vol. 50, No. 8 pp. 2035-2042, 2009.
- [12] Sachin Dnyandeo Kore & al, « Electromagnetic impact welding of copper-to-copper sheets », Int J Mater Form 3:117–121, 2010.
- [13] W. Demonie, K. Faes and W. De Waele, « Influence of process parameters on the weld quality of dissimilar CU-AL magnetic pulse welded sheets », International Journal Sustainable Construction & Design, Octobre 2016.
- [14] Verena Psyk, Christian Scheffler, Maik Linnemann, Dirk Landgrebe, « Process analysis for magnetic pulse welding of similar and dissimilar material sheet metal joints », International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, Cambridge, United Kingdom, 17-22 September 2017.

Bibliographie

- [15] G. VINSARD, « Modélisation de l'Electromagnétisme et des transferts de thermiques couplés dans le cadre du chauffage par induction - Application à la simulation d'un procédé industriel », Thèse de doctorat de l'I.N. P de Lorraine, (Mécanique et Energétique), 16 Février 1990.
- [16] A. CHENTOUF, « Contribution à la modélisation électrique, magnétique et thermique d'un applicateur de plasma inductif haute fréquence », Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 01 Décembre 1994.
- [17] A-C. Jeanson, G. Avrillaud, et al. « Identification du comportement mécanique dynamique de tube d'aluminium par un essai d'expression électromagnétique » CSMA 2013 le colloque notionnel en calcul des structures, Mai 2013.
- [18] MM. Brower D.F et Wildi P., «The magnetic pulse metal-forming technique», Techniques of metal research (Volume 1, Part 3 Chapitre35), (Page 1589 - 1555).
- [19] MM. FLEURY P. et MATHIEU JP, « Physique générale et expérimentale », Editions EYROLLES 1962.
- [20] SARL Metatron, « Le magnétoformage » (consulté le 23 septembre 2015).
- [21] Abderrahmen BOUSBA, Yaaqoub NEDJARI BENHADJ ALI, « Etude et Modélisation d'Applications Industrielles du Formage Electromagnétique », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel. 2017.
- [22] Victor Songmene, « mise en forme par déformation plastique », PhD Professeur, génie mécanique.
- [23] « Soudure I.B.D soudage par impulsion magnétique », 2016 ; Available from. <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnétique> ,15 avril 2018.
- [24] M. Watanabe et. Kumai, « High-speed deformation and collision behavior of pure aluminum plates in magnetic pulse welding » Materials Transactions, Vol. 50, No. 8, pp. 2035 -2042, 2009.
- [25] INRS. (2014, Juillet) Document INRS Guide de ventilation n°7 « Opérations de soudage à l'arc et de coupage » Consulté sur. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20668>.
- [26] E. Vanvuchelen, « Le soudage parfait par impulsion magnétique », Industrie Technique et Management », 21 juin 2010.
- [27] MM. Brown W.F., Banaos J. et Olson N.T « Pulsed magnetic welding of breeder reactor fuel pin end closures », Welding journal, Article présenté au Meeting annuel à la New Orléans – LOUISIANA, Juin 1978.
- [28] S. Barras « Soudure et formage par impulsion électrique », Innovation prototypes systèmes, PROVENCE.
- [29] MM. Leroy M. et Reynaud J.Y. A.R.M.E.C.A. « Bobines pour champs magnétiques intenses ». Brevet N° 75 35 401 du 19 Novembre 1975.

Bibliographie

- [30] MM. Brown W.F., Banaos J. et Olson N.T. « Pulsed magnetic welding of breeder reactor fuel pin end closures », Welding journal de Juin 1978 - Article présenté au Meeting annuel à la New Orléans – LOUISIANA, 3 et 7 Avril 1978.
- [31] B. M.C. TOMAS « Magnetic pulse welding » Thèse de master en génie mécanique, Lisbonne, 2010.
- [32] A. Weber, « The cold-welding process is being used for more and more high-volume applications », Assembly Magazine, Aout, 2002.
- [33] <http://www.bmax.com/fr/application/>
- [34] http://www.pft-innovaltech.fr/cpt_tim-1.php
- [35] Aurore.Guglielmetti, « Etude numérique du soudage par impulsion magnétique » thèse doctorat université de technologie de Compiègne université du Québec à Chicoutimi, 29 juin 2012.
- [36] Nehal Ouassila, « Etude et Modélisation des paliers planaires ». Mémoire de magistère En électrotechnique, Université de Constantine. 2009.
- [37] Valentin Préault, « Méthodes d'homogénéisation pour la modélisation électromagnétique de matériaux composites », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud, 2013.
- [38] Lotfi. Chouikhi « palier à lévitation magnétique : modélisation et optimisation », mémoire de magistère, Université de constantine, 2002.
- [39] Ali.rezik « étude comparative des différents modèles éléments finis pour le calcul des forces d'origine magnétique » mémoire de magistère, université de Jijel, 2002.
- [40] Abdenour Bahloul, Souhil Boukendir, « Etude et Modélisation de soudage des pièces Industrielles par impulsion magnétique ». Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Jijel,2019.
- [41] Dj. Belfares et Y. Touati, « Modélisation électromagnétique et mécanique de l'expansion d'un tube par magnétoformage » mémoire de fin d'étude de l'université de Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [42] I. Hafsaoui, « Etude et modélisation numérique tridimensionnelle des effets mécaniques du champ électromagnétique » thèse doctorat de l'université de Jijel, 2008.
- [43] D.K. Cheng, « field and wave electromagnetic », Addison-wesley, 2nd edition, 1991.
- [44] A. Kovetz, « the principles of electromagnetic theory », Cambridge University Press, 1990.
- [45] D.A. Olivera, « electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: experiment and model », thème de master, université de waterloo, Ontario Canada ,2002.
- [46] V.S. Arpaci, « introduction to heat transfer », Prentice Hall, upper Saddle River, 2002.
- [47] COMSOL Multiphysics 3.5

Bibliographie

- [48] PeeteenutTriwong, « modélisation numérique 3D des phénomènes couplés dans les procédés d'élaboration par induction : couplage faible et couplage fort », INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 11 Juillet 2008.
- [49] Soualmia Asma, « Conception et Modélisation d'inducteurs pour la fusion par induction ». Mémoire de fin d'étude, Université de Constantine. 2014.
- [50] Mitsuhiro Watanabe, Shinji Kumai, « Dissimilar Metal Joining of Aluminum and Copper Plates Using Magnetic Pulse Welding and Their Joint Strength ». Proceedings of the 4th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'18) Madrid, Spain – August 16 – 18, 2018.
- [51] T. Sapanathan¹, K. Yang¹, N. Buiron¹ and M. Rachik¹, « Insight into the realistic behavior of magnetic pulse forming and welding processes using numerical simulations »,sourbonne universités.
- [52] A. Elsen, M. Ludwing, R. Schaefer, P. Groche, « Fundamentals of EMPT-Welding ». Presented at the 4th International Conference on High speed Forming, pp. 117-126, Columbus, Ohio,USA, 2010.

RESUME

L'assemblage par impulsion magnétique, technique de plus en plus utilisée dans l'industrie, est un procédé qui permet l'assemblage rapide (en quelques micro secondes) de matériaux similaires ou dissimilaires à l'état solide. Ce procédé se base sur la génération des forces électromagnétiques dans une pièce conductrice au moyen d'un inducteur parcouru par un courant variable et intense, de forme impulsionnelle. Les modèles numériques développés sous environnement COMSOL sont destinés à étudier, analyser et prévoir le comportement des pièces de forme plate ou tubulaire, assemblées par impulsion magnétique. Les applications de ce travail concernent des systèmes industriels innovants, utilisés particulièrement dans l'industrie d'automobiles. Les résultats numériques obtenus sont comparés et validés par des travaux expérimentaux antérieurs.

ABSTRACT

Magnetic pulse welding, a technique increasingly used in industry, is a process that enables the rapid assembly of similar or dissimilar materials in the solid state. This process is based on the generation of electromagnetic forces in a conductive part by means of an inductor carrying a variable and intense current, of pulse form. The numerical models developed under COMSOL environment are intended to study, analyze and predict the behavior of flat or tubular parts, assembled by magnetic pulse. The applications of this work relate to innovative industrial systems, particularly used in the automotive industry. The numerical results obtained are compared and validated by previous experimental works.

ملخص

التلحيم بالذنبات المغناطيسية ، وهي تقنية تستخدم بشكل متزايد في الصناعة ، هي عملية تسمح بالتجميع السريع للمواد المماثلة أو غير المتشابهة في الحالة الصلبة. تعتمد هذه العملية على توليد القوى الكهرومغناطيسية عن طريق ملف يجتازه تيار متغير ومكثف ، على شكل ذنبية.

تهدف النماذج الرقمية المطورة عن طريق بيئة COMSOL إلى دراسة وتحليل والتنبؤ بسلوك الأجزاء المسطحة أو الأنبوبية المجمعّة بواسطة نبضة مغناطيسية. تتعلق تطبيقات هذا العمل بالأنظمة الصناعية المبتكرة ، المستخدمة بشكل خاص في صناعة السيارات. النتائج العديدة التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها والتحقق من صحتها من خلال الأعمال التجريبية السابقة.