

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
Département d'Aéronautique

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Aéronautique

**MODELISATION DU SOUDAGE PAR LASER CO<sub>2</sub>**

Par

**SAID BENZAOUZ**

Devant le jury proposé :

S. BOUKRAA	Professeur, U. de Blida	Président
T. REZOUG	Maître de Conférences, U. de Blida	Rapporteur
S. BERGHEUL	Maître de Conférences, U. de Blida	Examineur
R. HOAUI	Maître de Conférences, U.S.T.H.B, Alger	Examineur
H. ELBESSGHI	Chargé de Cours, U. de Blida	Invité

## RESUME

Ce travail contribue dans la modélisation du phénomène du soudage laser CO<sub>2</sub> afin d'étudier le comportement thermique et l'influence des différents paramètres du procédé sur les dimensions du cordon de soudure.

Le modèle simulant la source d'énergie de soudage, utilise une distribution surfacique gaussienne du flux de chaleur provenant du faisceau laser. La forme de cette source est supposée hémisphérique, tout en procédant à l'évaluation des champs thermiques à chaque instant, pour déterminer les dimensions du cordon de soudure, l'effet de la vitesse de soudage et la puissance incidente sur ces dernières. L'équation de chaleur régissant le problème est discrétisée et résolue à l'aide du logiciel COMSOL, qui est basé sur la méthode des éléments finis. Les calculs sont effectués en considérant que les propriétés physiques et thermiques ainsi que les conditions aux limites de convection et rayonnement, sont dépendante de la température. Pour évaluer la validité du modèle, une comparaison avec des mesures expérimentales effectuées, les résultats indiquent un accord plus au moins satisfaisant.

## **ABSTRACT**

This work contributes in the modelling of the phenomenon of laser CO<sub>2</sub> welding in order to study the thermal behaviour and the influence of different parameter from the process on dimensions of the weld bead.

The model simulating the source of energy of welding uses a surface Gaussian distribution of the heat flow, coming from the laser beam. The form of this source is supposed to be hemispherical, while carrying out the evaluation of the thermal fields at every moment, to determine dimensions of the weld bead, the effect of the welding speed and the incident power on these last. The heat equation governing the problem is discretized and solved using the software COMSOL, which is based on the finite element method. Calculations are carried out by considering that the physical properties and thermal as well as the boundary conditions of convection and radiation, are dependent on the temperature. To evaluate the validity of the model, a comparison with the experimental measurements, the results indicate an agreement at least satisfactory.

## ملخص

يساهم هذا العمل في وضع نموذج لظاهرة اللحام بالليزر CO2 لدراسة السلوك الحراري ، وتأثير مختلف معلمة من هذه العملية على أبعاد شريط اللحام.

نموذج محاكاة مصدر الطاقة لاستخدامات اللحام سطح متعلق بالغاوس توزيع الحرارة تدفق القادمين من اشعة ليزر. شكل هذا المصدر من المفترض أن يكون نصف كروية ، من اجل إجراء تقييم للمجالات الحرارية في كل لحظة ، تحديد الأبعاد ، ومدى تأثير سرعة اللحام وقوة الليزر على هذه الأخيرة.

لإيجاد حل لمعادلة الحرارة التي تحكم هذه الظاهرة نستخدم برمجيات COMSOL ، التي تقوم على أساس العناصر المنتهية. الحسابات التي تقوم هي مبنية على أساس أن الخصائص الفيزيائية والحرارية ، فضلا عن شروط الحدود الحراري والإشعاع ، بدلالة درجة الحرارة. لتقييم صلاحية النموذج ، و مقارنة مع القياسات التجريبية ، فإن النتائج تشير إلى اتفاق مرض نسبيا.

## REMERCIEMENTS

Je remercie dieu «Allah» qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour terminer ce travail.

Ce travail a été effectué au Département d'Aéronautique de BLIDA (DAB) dirigé par Monsieur le Professeur SALAH BOUKRAA, qui me fait l'honneur de présider les jurys. Je l'en remercie sincèrement.

Que Monsieur T.REZOUG, Maître de Conférence au Département d'Aéronautique de BLIDA (DAB), Président du conseil scientifique, reçoive toute l'expression de ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet, et, pour tout son dynamisme et ses compétences scientifiques qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie tous particulièrement, et je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur SAID BERGHEUL, Maître de Conférence au Département d'Aéronautique de BLIDA (DAB).

Je tiens également à remercier Monsieur RABAH.HAOUI, Maître de Conférence à l'université des sciences technologique (USTHB), d'avoir accepté de participer au jury de ce travail.

Je veux adresser tous mes remerciements à Monsieur HALIM ELBESSEGHI, Chargé de Cours, Chef de département Tronc Commun de la faculté des sciences à l'université SAAD DAHLEB de BLIDA, pour ses conseils et directives qui m'ont aidé à réaliser ce travail, et d'avoir accepté d'être parmi les membres de jury.

Je tiens également à remercier mes parents et toute ma famille, pour leurs soutiens et aides le long de ce travail.

En fin, que tous ceux ou celles qui m'ont prêté leurs soutiens et leurs amitiés le long de ce travail, trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

## TABLE DE MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ILLUSTRATION, FIGURES ET TABLEAUX

INTRODUCTION .....	13
1. GENERALITES SUR LE SOUDAGE.....	16
1.1 Introduction .....	19
1.2 Données de base des différents procédés.....	20
1.3 Les différents procédés usuels en aéronautique.....	20
1.3.1 Le soudage T.I.G .....	21
1.3.1.1 Avantages et inconvénients du soudage T.I.G.....	22
1.3.2 Le soudage par friction. ....	23
1.3.3 Soudage par faisceau d'électron.....	23
1.3.4. Soudage laser.....	26
2. LE SOUDAGE LASER.....	27
2.1 Historique .....	27
2.2 Principe du laser .....	28
2.3 Les différentes sources Laser.....	29
2.3.1 Les lasers CO2.....	29
2.3.1.1 Les lasers CO2 à flux axial rapide.....	29
2.3.1.2 Les lasers CO2 à flux transverse.....	30
2.3.2 Les lasers YAG.....	31
2.3.2.1 Les lasers YAG continus.....	31
2.3.2.2 Les lasers YAG pulsés.....	32
2.3.3 Les lasers excimères.....	32
2.3.4 Les lasers à diodes.....	32

2.4	Caractéristique du soudage des métaux par laser de puissance.....	34
2.4.1	Introduction .....	34
2.5	Caractérisation du soudage par Keyhole .....	35
2.5.1	Création du capillaire.....	35
2.6	Dynamique du Keyhole.....	35
2.7	Transfert d'énergie en soudage par keyhole.....	36
2.8	Formation du cordon et propriétés.....	38
2.9	Soudabilité laser des métaux.....	38
2.10	Paramètres du soudage par laser et leurs effets.....	39
2.11	Optimisation des paramètres du soudage par laser.....	42
2.12	Avantages et inconvénients du soudage par laser.....	42
2.12.1	Avantages du procédé.....	42
2.12.2	Contraintes du procédé.....	43
2.13	Conclusion .....	43
3.	MODELISATION DU PROBLEME.....	44
3.1	Introduction .....	44
3.2	Modèle proposé.....	44
3.2.1	Description du modèle.....	44
3.3	Position du problème et hypothèse .....	45
3.3	Bilan d'énergie.....	47
3.4	Modélisation sur COMSOL.....	50
3.4.1	Présentation du problème.....	50
3.4.2	Transferts thermiques.....	51
3.4.3	Conditions aux limites .....	51
3.4.4	Facteurs d'absorption .....	51
3.4.5	Rayon de la tache focale .....	52
3.5	Méthode numérique .....	54
3.5.1	Introduction.....	54
3.5.2	Descriptif de la méthode numérique utilisée par le logiciel COMSOL.....	55
3.5.3	Schéma du calcul numérique. ....	56
4.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	58
4.1	Soudabilité des alliages de magnésium.....	58
4.1.1	Composition chimique du matériau .....	58
4.1.2	Données du problème.....	58

4.1.3 Génération de maillage.....	59
4.1.4 Formation du keyhole. ....	60
4.1.5 Champs thermique.....	60
4.1.6 Flux de chaleur.....	62
4.1.7 Influence des paramètres du soudage sur la profondeur de pénétration..	63
4.1.8 Influence de la vitesse de déplacement sur la largeur du cordon.....	67
4.2 Soudabilité des alliages d'aluminium.....	68
4.2.1 Composition chimique du matériau.....	68
4.2.2 Données du problème.....	68
4.2.3 Génération de maillage.....	69
4.2.4 Formation du Keyhole.....	70
4.2.5 Champs thermique.....	70
4.2.6 Flux de chaleur.....	72
4.2.7 Influence des paramètres du soudage sur la profondeur de pénétration..	73
4.2.8 Influence de la vitesse de déplacement sur la largeur du cordon.....	76
4.3 Conclusion.....	77
4.4 Comparaison du soudabilité de l'alliage WE43 et l'alliage AU AU4G /2017A .	78
CONCLUSION.....	80
APPENDICE A.....	82
REFERENCES.....	84



## LISTE DES ULUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1.les différents procédés du soudage.....	18
Figure 1.2.Comparaison d'énergie.....	18
Figure 1.3. Le procédé T.I.G.....	20
Figure 1.4. Soudage par friction.....	23
Figure 1.5.Cordon de soudure.....	23
Figure.1.6 soudage par faisceau d'électron.....	25
Figure.2.1 Laser CO2 à flux axial rapide.....	29
Figure.2.2 Laser CO2 à flux transverse.....	30
Figure.2.3 Laser YAG continu.....	31
Figure.2.4 Laser YAG pulsés.....	33
Figure.2.5 Laser excimères.....	33
Figure 2.6. Principe du soudage Laser.....	34
Figure 2.7. Formation du capillaire.....	35
Figure 3.1 Phénomènes thermiques.....	45
Figure. 3.2 Schématisation de la soudure laser.....	47

Figure.3.3 Forme simplifiée de la zone du soudage.....	48
Figure 3.4 Interaction laser/tôle.....	50
Figure 3.5 Organigramme du calcul.....	57
Tableau 4.1.1 Composition chimique du WE43.....	58
Tableau 4.1.2 Données du problème.....	58
Figure 4.1.3 Géométrie maillée.....	59
Figure 4.1.4 maillage des frontières.....	59
Figure 4.1.5 géométrie de la zone fondue (keyhole), pour une absorptivité de la température temps=5ms.....	60
.	
Figure 4.1.6 champs de température, pour une absorptivité qui dépend de la température .....	61
Figure 4.1.7 Pic de température pour une absorptivité qui dépend de la température.....	61
Figure 4.1.8 Flux de chaleur conductif pour une absorptivité en fonction de la température....	62
Figure 4.1.9 Flux de chaleur radiatif pour une absorptivité en fonction de la température.....	62
Figure 4.1.10 Variations de la profondeur en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	63
Figure 4.1.11 Variations de la profondeur en fonction de la puissance incidente, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	64
Figure 4.1.12 variation de la profondeur en fonction de l'énergie linéique, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	65
Figure 4.1.13 Comparaison entre les résultats expérimentaux et théorique pour une largeur de cordon de 2.5 mm.....	66

Figure 4.1.14 Variations de la largeur du cordon en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm .....	67
Tableau 4.2.1 Composition chimique du AU4G /2017A.....	68
Tableau 4.2.2 Données du problème.....	68
Figure 4.2.3 Géométrie maillée.....	69
Figure 4.2.4 géométrie de la zone fondue (keyhole), pour une absorptivité en fonction de la température.....	70
Figure 4.2.5 champs de température, pour une absorptivité qui dépend de la température.....	71
Figure 4.2.6 Pic de température, pour une absorptivité en fonction de la température.....	71
Figure 4.2.7 Flux de chaleur conductif pour une absorptivité en fonction de la température ...	72
Figure 4.2.8 Flux de chaleur radiatif pour une absorptivité en fonction de la température.....	72
Figure 4.2.9 Variations de la profondeur en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	73
Figure 4.2.10 Variations de la profondeur en fonction de la puissance incidente, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	74
Figure 4.2.11 Variations de la profondeur en fonction de l'énergie linéique, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	75
Figure 4.2.12 Variations de la largeur du cordon en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.....	76

Figure 4.4.1 Variation de la profondeur de pénétration en fonction de la vitesse de déplacement pour une puissance incidente de 5kw, une largeur du cordon de 1mm et un diamètre de faisceau de 0.35mm..... 78

Figure 4.4.1 variation de la profondeur de pénétration en fonction de la puissance incidente pour une vitesse de déplacement de 400cm/min, une largeur du cordon de 1mm et un diamètre de faisceau de 0.35mm..... 79

## INTRODUCTION

Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge de bronze, ce n'est que depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis solidification de matériaux pour constituer un assemblage dit par soudage. Il fallait pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation des structures aéronautiques ou autre.

On commence alors à parler de mécano-soudage. Or, les seuls procédés industrialisés de façon importante sont la soudure oxyacétylénique et la soudure à l'arc à l'électrode enrobée. Au fur et à mesure de la maîtrise des sources thermiques (arc électrique, Laser, plasma d'arc, faisceau d'électrons) et des systèmes automatisés, les différents procédés ont gagné en fiabilité et en qualité de réalisation.

Parmi l'ensemble des procédés, le soudage par faisceau laser est utilisé pour des réalisations délicates qui requièrent des qualités d'assemblage optimales. Il met en jeu un faisceau laser entre la tête de focalisation et les pièces à souder avec ou sans protection gazeuse. Le soudage par faisceau laser est ainsi un procédé de prédilection dans des secteurs aussi variés que le nucléaire, l'aéronautique, l'automobile, les industries chimiques et agro-alimentaires.

La première étape critique dans l'analyse précise de comportement physique de la soudure, est l'évaluation d'une carte thermiques qui détermine le champ de températures dans l'assemblage soudé, et de prédire ainsi les dimensions de la zone fondue (profondeur et largeurs du cordon de soudure).

Donc, la simulation numérique du procédé de soudage, qui met en jeu de hautes températures, est un moyen d'accès privilégié aux grandeurs thermiques qui caractérise le

procédé à étudier. La modélisation des interactions complexes entre des phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques et la mise en oeuvre des méthodes numériques particulières est indispensable pour la simulation d'un procédé de soudage.

La simulation numérique du soudage permet une meilleure compréhension des mécanismes de formation du cordon de soudure, elle permet aussi d'établir les liens de cause à effet entre le mode opératoire et les caractéristiques résultantes du joint soudé. De plus, le modèle numérique permet de capitaliser les connaissances acquises par l'expert scientifique, à travers l'établissement de certaines relations empiriques et de lois physiques.

L'objet de notre travail, est de modéliser et définir numériquement les cartes thermiques en déduisant la dimension du cordon de soudure (profondeur de pénétration et largeur du cordon) et l'effet des différents paramètres du procédé de soudage par faisceau laser CO<sub>2</sub> sur cette dernière.

Le problème à étudier est bidimensionnel instationnaire, la source de chaleur surfacique à distribution gaussienne de forme hémisphérique, les propriétés physiques sont en fonction de la température. Les deux alliages considérés pour l'application sont l'alliage de magnésium WE43 et l'alliage d'aluminium AU4G /2017A, qui sont utilisés en aéronautique.

La modélisation mathématique du problème donne des équations assez complexes. Pour cela, et d'après les recherches bibliographiques, on a opté pour le logiciel COMSOL, qui utilise la méthode des éléments finis comme méthode numérique pour discrétiser les équations du problème de soudage.

Notre travail comporte quatre chapitres :

Le chapitre 1 : Ce chapitre est une synthèse bibliographique, dans laquelle on va donner des généralités sur l'opération du soudage, plus particulièrement les procédés les plus usuels en aéronautique.

Le chapitre 2 : dans ce chapitre, on va présenter le procédé du soudage laser qui fait objet de notre travail, les différents sources laser, les caractéristiques du soudage des matériaux par laser de puissance et la dynamique du « keyhole ».

Le chapitre 3 : dans ce chapitre et à partir du bilan énergétique et en tenant compte des hypothèses simplificatrices, des conditions initiales et aux limites, on propose un modèle très simple pour l'estimation des dimensions de la zone fondue (profondeur et largeur du cordon) en fonction des différents paramètres du soudage laser par CO<sub>2</sub>. On présente aussi l'organigramme de calcul, le logiciel et la méthode numérique utilisés.

Le chapitre 4 : dans ce chapitre on présente les différents résultats obtenus, leurs interprétations et leurs validités.

A la fin, une conclusion général et des perspectives qui clôtureront notre travail.

## **CHAPITRE 1**

### **GENERALITES SUR LE SOUDAGE**

#### 1.1 Introduction

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique, et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois, de la composition chimique élaborée, et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones.

La zone fondue (Nommée **ZF**) : Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue [1].

La zone affectée thermiquement : (Nommée **ZAT**) Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique [1].

La zone de liaison : Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé[1].



Le métal de base : Au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée thermiquement [1].

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base, et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage [1].

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Le faible temps de maintien de la température maximale.
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est donc responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique du matériau, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile [1].

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques.
- Le couple métal d'apport - gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone affectée thermiquement.

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en oeuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autre la continuité métallique est obtenu sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en oeuvre comme présenté sur la Figure 1.1.

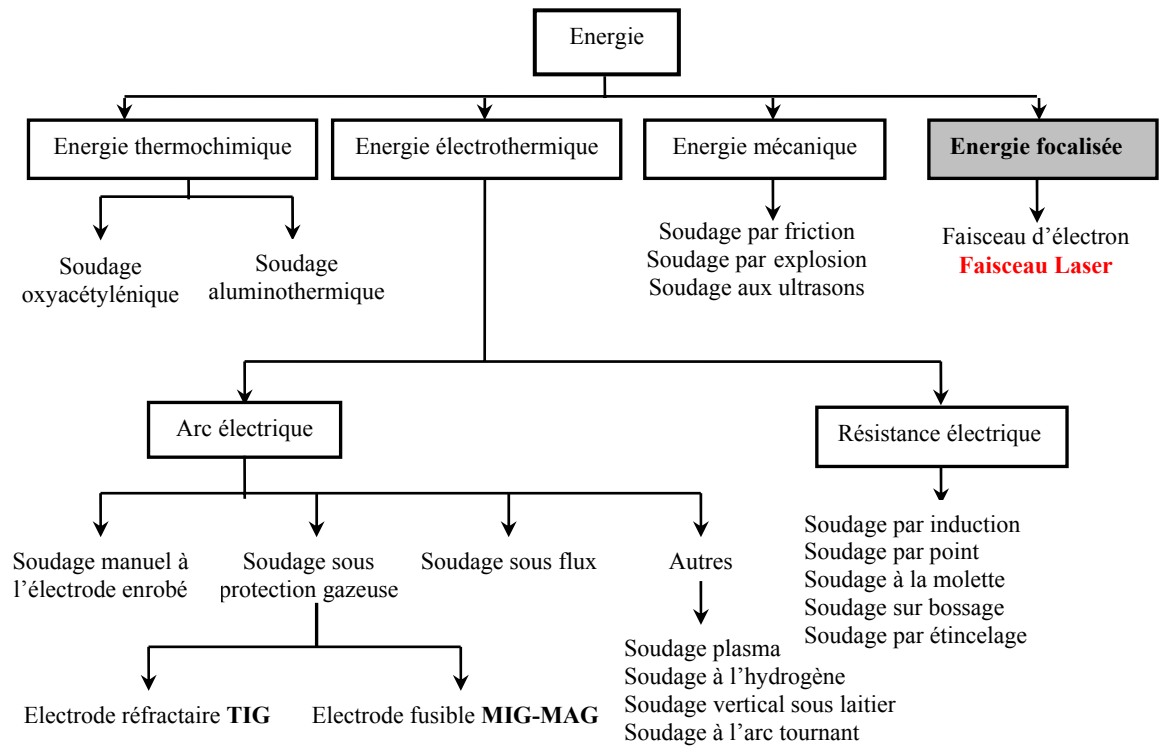


Figure 1.1.les différents procédés du soudage.

La conséquence directe de cette classification est la comparaison fondamentale des énergies des différentes sources. Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre eux (Figure 1.2) [1].

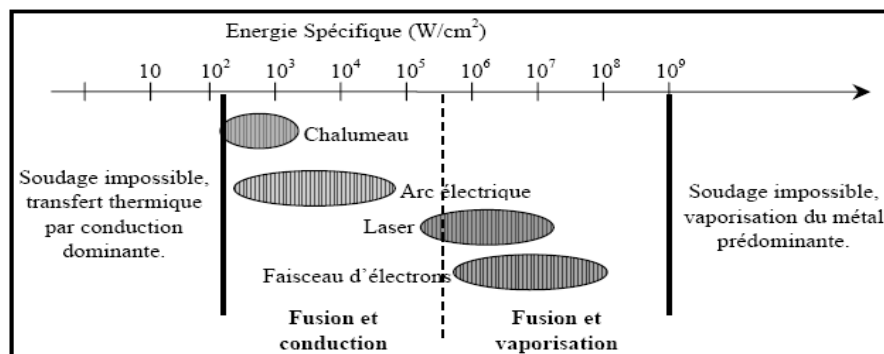


Figure 1.2.Comparaison d'énergie

Il ressort alors que les procédés à l'arc électrique ont des densités d'énergie moyennes et que leur rendement va varier suivant que l'on ait ou non transfert de métal. En effet, ce dernier facteur va nettement conditionner le rendement d'arc mais surtout le taux de dépôt de métal qui est un des critères de production important dans le choix du procédé pour une réalisation donnée.

## 1.2 Données de base des différents procédés

Les procédés de soudage opèrent dans leur majorité par la mise locale des pièces à souder à température de soudage (température de fusion la plupart du temps) au niveau de leur joint ; cette mise à température s'effectue soit progressivement, soit globalement dans l'espace et dans le temps, au moyen d'une source de chaleur pouvant être associée, pour certains d'entre eux, à un dispositif de pression mécanique s'exerçant pendant le processus de formation de la liaison.

La nature offre divers phénomènes physiques exothermiques, tels la combustion, l'ionisation, la conduction électrique, le frottement, l'impact d'électrons, l'interaction onde/matière, que des inventeurs ont su organiser en vue de les appliquer à la réalisation de liaison continue de la matière, dans le but de permettre, faciliter ou améliorer la manufacture d'objets usuels ou nouveaux [2].

Ces phénomènes forment la base essentielle des divers procédés en usage dont la littérature spécialisée donne une classification complète communément admise par les spécialistes, à partir de quelques critères pris comme référence, comme par exemple celle de l'Institut International de la Soudure.

Plus précisément sont mis en œuvre, de façon conjuguée ou non un effet thermique, un effet mécanique, un apport de métal à quoi il faut associer une durée ou une vitesse d'exécution [2].

Dans ce qui suit, on va présenter les différents procédés du soudage les plus usuels en aéronautique.

### 1.3 Les différents procédés usuels en aéronautique

#### 1.3.1 Le soudage T.I.G

Par définition, le terme « **T.I.G** » est l'abréviation de « Tungsten Inert Gas » et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée « GTAW ». Le soudage à l'arc au tungstène est un procédé qui utilise un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège l'arc électrique et la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage.

Le métal d'apport peut être ou ne pas être utilisé. Lorsque l'on a besoin de métal complémentaire, on utilise une baguette d'apport qui vient alimenter le bain de fusion remplissant ainsi le joint à souder. La technique de soudage utilisée est la même que pour le procédé de soudage oxyacétylénique. Pendant qu'une main tient la torche pour amener le métal de base en fusion, l'autre tient la baguette et alimente le bain de fusion [1].

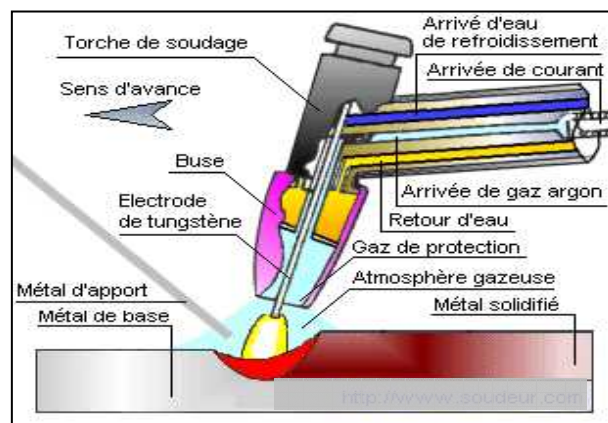


Figure 1.3. Le procédé T.I.G.

En résumé, on peut ainsi décrire ce procédé par, un arc qui est amorcé entre l'extrémité d'une électrode réfractaire (tungstène) et la pièce à souder en provoquant la fusion du métal de base. Une buse, concentrique à l'électrode, canalise un gaz inerte qui isole de l'atmosphère extérieure l'arc et le bain de métal en fusion. Le métal d'apport a d'ordinaire la forme de baguettes pour la torche manuelle ou de fil embobiné lorsqu'on veut un apport automatique [1].

Le procédé **T.I.G** peut être aisément automatisé, on trouve alors soit un banc de soudage qui permet d'effectuer des soudures rectilignes ou orbitales avec ou sans système d'amenée de métal d'apport, soit un robot articulé qui permet d'effectuer des trajectoires plus complexes [1].

#### 1.3.1.1 Avantages et inconvénients du soudage T.I.G

La grande qualité des soudures obtenues par le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse en fait un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux. Il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après la soudure.

Le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal. De plus, les soudures se font sans l'emploi du laitier, éliminant ainsi les inclusions de laitier. Le chauffage des pièces s'effectue sur une petite surface, le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage, relativement élevée.

En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. Le dépôt de soudure est très dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels les alliages de titane et le zirconium. Enfin, le procédé est idéal aussi pour effectuer des réparations et de petites séries de fabrication de pièces.

Procédé de soudage lent, il nécessite souvent les deux mains du soudeur. De plus, il n'est pas vraiment avantageux pour le soudage sur tôles épaisses. Il exige un équipement plus considérable que certains autres procédés.

- Équipement dispendieux.
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement.
- Déformations des pièces soudées.

Les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquences, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint [1].

### 1.3.2 Le soudage par friction

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en oeuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante [3].

C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte. Il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électro-conducteurs tels le cuivre et ses alliages [3].

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement, le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. Son point fort se situe au niveau de sa source de chaleur, de nature mécanique particulièrement facile à réaliser et à maîtriser grâce à sa stabilité naturelle. Il en découle pour les machines une morphologie très simple et des avantages intéressants : pas d'appel de courant élevé, pas de projections, des outillages sans usure, pas d'apport de métal coûteux, un contrôle aisé, etc., appréciés dans les ateliers de construction mécanique. Pour autant que l'on

puisse appliquer des serrages appropriés à la transmission du couple de friction et de l'effort de forgeage, il prend la première place par rapport aux autres [3].

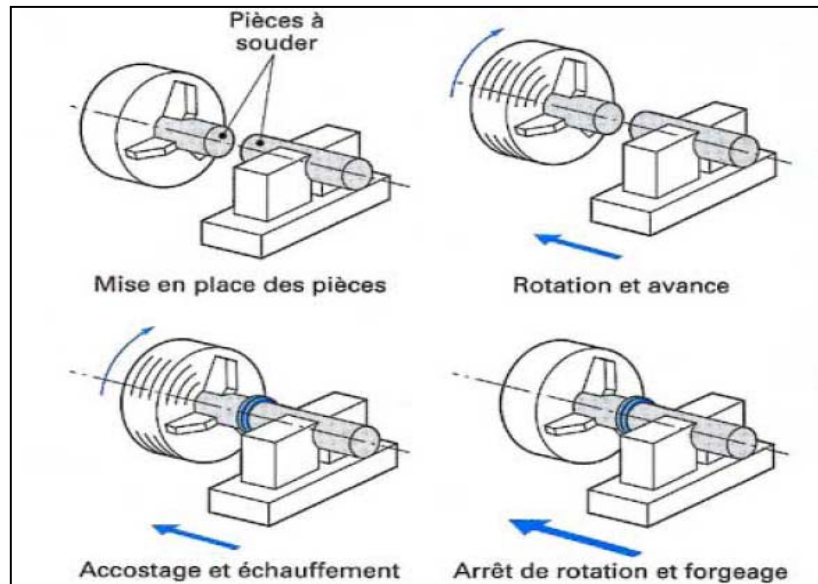


Figure 1.4. Soudage par friction.

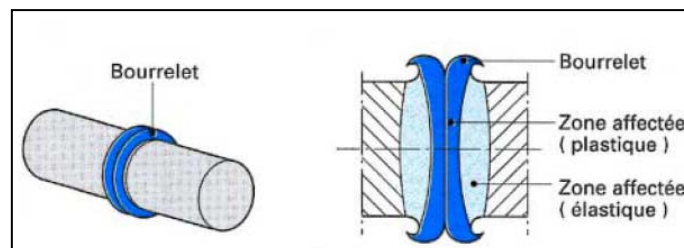


Figure 1.5. Cordon de soudure.

### 1.3.3 Soudage par faisceau d'électron

L'outil de ce procédé est le faisceau d'électrons généré dans un canon qui lui confère sa puissance et permet de le focaliser. Les électrons, dotés de masse et de charge électrique, proviennent d'un matériau émetteur (formant cathode), dans lequel ils sont naturellement présents et libres, et dont ils sont extraits par effet thermoélectrique sous vide (le matériau est porté à haute température sous vide poussé) et attraction électrique. L'attraction électrique les accélère et leur confère une énergie cinétique donnée par les lois simples de la mécanique. Le faisceau d'électrons émerge du canon selon son axe et continue de se propager en l'absence de toute particule ou de champ parasite qui dévierait les électrons de leur trajectoire par collision ou par influence, et donnerait lieu à diffusion. Les électrons, engendrés sous vide,

doivent donc impérativement se déplacer également sous vide : une enceinte étanche et son groupe de pompage forment la base de tout équipement de soudage.

La contrainte technologique du vide devient un avantage considérable pour la protection du bain de fusion vis-à-vis de l'atmosphère et pour l'effet de dégazage qui se produit avec certains matériaux.

Un électron est par nature sensible à un champ électrique (qui l'accélère) et à un champ magnétique (qui le dévie), l'un et l'autre sont mis à profit dans la conception des canons. En dehors du canon, le faisceau d'électrons est sensible au champ magnétique et au magnétisme rémanent dans les pièces en acier [4].

### Principe

Une opération de soudage s'exécute dans une machine (Figure 1.6) comportant nécessairement une enceinte à vide équipée d'un canon à électrons et dans laquelle se trouve disposé l'outillage qui reçoit les pièces à souder. Après fermeture étanche de l'enceinte, on doit réaliser d'abord, grâce au moyen de pompage à plusieurs étages, le niveau de vide opératoire requis [4].

On déclenche ensuite l'opération de soudage proprement dite qui comporte les phases suivantes :

- allumage du canon à électrons (chauffage de l'émetteur).
- Mise en marche du générateur haute tension alimentant le canon, le faisceau d'électrons apparaît instantanément et frappe le joint sur lequel il a été préalablement aligné, le capillaire s'établit aussitôt.
- Déplacement contrôlé de la pièce ou du canon.



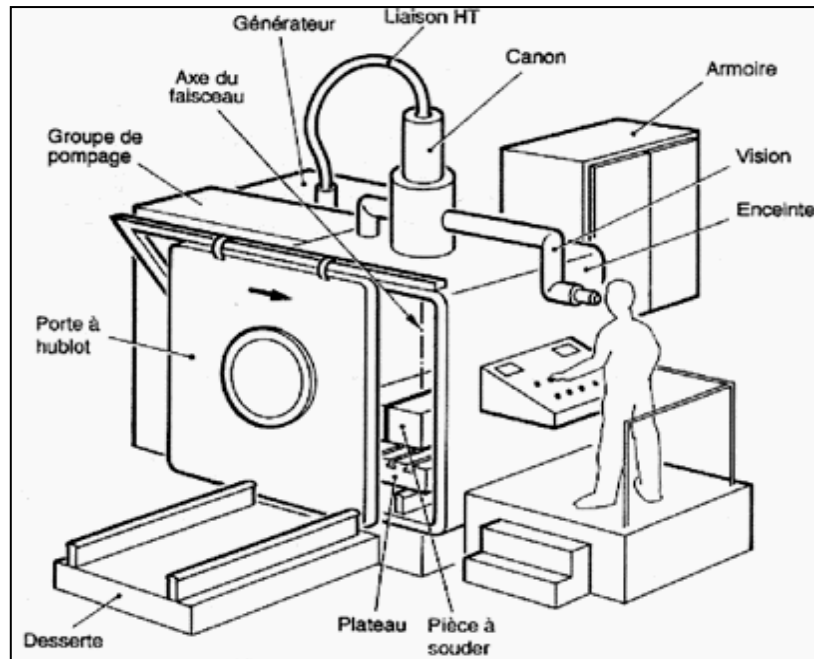


Figure.1.6 soudage par faisceau d'électron.

Le cordon se forme selon les paramètres de puissance, de vitesse et de focalisation préalablement définis. Lorsque la soudure est terminée, le faisceau est interrompu, le canon est éteint ou isolé. Le système de pompage est lui aussi isolé et l'enceinte peut être remise à l'air libre, puis ouverte afin de décharger l'assemblage soudé.

Le soudage par faisceau d'électron (FE) s'exécute en une seule passe et s'applique de préférence aux assemblages bord à bord, sans chanfrein, de pièces mécaniques ou de chaudronnerie de précisions préparées par usinage. Il n'y a pas, dans la majorité des cas, d'apport de métal. On peut réaliser des soudures très pénétrées ou débouchant.

Les possibilités de réglage en une seule gamme, et généralement dans un rapport de un à cent, de la puissance et de la vitesse de soudage sont dans le soudage par faisceau (FE) de loin les plus larges parmi tous les procédés, de sorte qu'un équipement de soudage par faisceau d'électron (FE) admet une très grande variété de matériaux et d'épaisseurs à souder. Nécessairement automatisé, il reste de ce point de vue le procédé le plus souple [4].

#### 1.3.4. Soudage laser

C'est le procédé qui fait l'objet de notre travail, L'outil de ce procédé est un rayon laser puissant généré dans une cavité comportant un milieu actif amplificateur et se propageant dans l'atmosphère ou dans un guide jusqu'à une optique de focalisation permettant de l'utiliser. L'onde est caractérisée par sa puissance et sa fréquence. Cette dernière est déterminée par l'énergie des photons émis par les atomes ou les molécules du milieu actif [5].

Le soudage laser, comme le soudage par faisceau d'électrons, fait partie des procédés de soudage dits « soudage à haute énergie ». il repose sur la concentration en un point d'un faisceau laser, cette concentration du faisceau appelée également focalisation permet d'obtenir au point d'impact des densités de puissance supérieures au MW/cm<sup>2</sup>.

Contrairement aux procédés conventionnels, les procédés à haute énergie ne réalisent pas la fusion des matériaux à souder par transfert thermique de la surface vers l'intérieur de la pièce mais bénéficient de la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques.

La formation du capillaire permet donc un transfert direct de l'énergie au cœur de matière, permettant ainsi d'obtenir des cordons de soudure beaucoup moins larges que pénétrants [5].

## **CHAPITRE 2 LE SOUDAGE LASER**

### 2.1 Historique

Le principe de l'émission stimulée, production sur commande d'un photon par un électron, est décrit par Albert Einstein dès 1917. Toutefois, la première application pratique ne voit le jour qu'à la fin de l'année 1953, dans le domaine des micro-ondes, il s'agit du maser (acronyme de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Si le premier maser est l'œuvre d'une équipe de physiciens américains, composée notamment de Charles Townes et Arthur Schawlow, les bases de cette technologie sont également développées parallèlement et indépendamment par une équipe russe constituée par Aleksander Prokhorov et Nicolaï Bassov, qui réalisent à leur tour un maser au début de l'année 1954. Cependant, la réalisation de masers optique ou infrarouge, c'est-à-dire de lasers, reste un défi pour la communauté scientifique .

En 1958, Townes et Schawlow publient et brevètent leur théorie sur le principe de fonctionnement d'un laser (l'antériorité de l'invention a été contestée par le physicien et ingénieur américain Gordon Gould, qui a obtenu gain de cause en 1977 pour l'une des composantes du système). Finalement, c'est leur compatriote Theodore Maiman qui obtient pour la première fois une émission laser en 1960, en excitant des cristaux de rubis. Un an plus tard, en 1961, le physicien américain d'origine iranienne Ali Javan met au point un laser à gaz (hélium et néon). Puis, en 1966, le physicien américain Peter Sorokin construit le premier laser à liquide .

## 2.2 Principe du laser

Le mot « laser » est l'acronyme de l'anglais Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation « amplification de la lumière par émission stimulée de radiations ». Dispositif qui amplifie la lumière et la rassemble en un étroit faisceau, dit cohérent, où ondes et photons associés se propagent en phase, au lieu d'être arbitrairement. Cette propriété rend la lumière laser extrêmement directionnelle et d'une grande pureté spectrale [6].

Le principe du laser consiste à exciter les électrons d'un milieu, puis à y déclencher l'émission de photons en cascade sous forme de rayon. Pour ce faire, le dispositif du laser consiste en un réservoir d'électrons (milieu fertile qui peut être solide, liquide ou gazeux) appelé milieu actif, associé à une source excitante qui élève les électrons à des niveaux d'énergie supérieurs. Cette excitation du milieu actif est appelée « pompage ».

Dans une seconde phase, de la lumière est injectée dans le milieu, provoquant des collisions entre électrons excités et photons. Lors de ces collisions, les électrons excités retournent à leur niveau d'énergie initial en émettant de nouveaux photons. Ce processus d'émission stimulée, d'origine quantique, produit l'amplification de la lumière. Deux miroirs situés aux extrémités du laser se réfléchissent les photons émis, la lumière se densifiant à chaque parcours. L'un des deux miroirs est semi-réfléchissant, ce qui permet à une fraction de la lumière d'être relâchée à chaque aller-retour.

La lumière laser doit sa cohérence au fait que les photons du milieu naissent sur le passage d'autres photons qui sont en phase avec eux dans leur déplacement. De plus, les photons obtenus par émission stimulée ont la même énergie et la même direction que les photons incidents, ce qui explique la pureté et la directivité du faisceau, les photons qui ne se déplacent pas dans l'axe des miroirs vont se perdre dans les parois opaques. Dans le cas de lasers impulsionnels, il n'y a pas de miroir semi-réfléchissant, le laser est équipé d'un obturateur qui libère le faisceau lorsque l'on commande le tir. Entre deux impulsions, il faut un certain temps pour que le milieu actif soit convenablement pompé.

## 2.3 Les différentes sources Laser

Le procédé de soudage Laser nécessite des sources qui doivent fournir des densités de puissance de l'ordre de  $1-5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ . En effet, les sources laser utilisées en soudage sont du type Nd : YAG ou laser à  $\text{CO}_2$ . D'autres sources laser, à savoir, les lasers à rubis ont été introduits dans quelques applications de soudage. Les lasers à CO sont en stade d'évolution pour des besoins de soudage. Les sources les plus prometteuses dans le domaine du soudage seront les diodes laser [6].

### 2.3.1 Les lasers $\text{CO}_2$

Il existe différentes technologies de laser à  $\text{CO}_2$  : les lasers  $\text{CO}_2$  à flux axial rapide; les lasers  $\text{CO}_2$  à flux transverse. Ces techniques dépendent de l'utilisation recherchée et de la puissance maximale pouvant être extraite de la cavité .

#### 2.3.1.1 Les lasers $\text{CO}_2$ à flux axial rapide

Le mélange gazeux circule à grande vitesse, propulsé par des pompes roots ou des turbines. Il est introduit dans la cavité, constituée de tubes en verre, dans laquelle il circule axialement, puis traverse des échangeurs thermiques qui assurent son refroidissement. Une partie de ce gaz est évacuée à l'extérieur, tandis que du gaz neuf est injecté simultanément. L'excitation électrique, par décharge continue ou par radiofréquence, s'effectue dans les différentes sections du tube. Une partie du faisceau passe au travers le miroir de sortie semi transparent, et se transmet vers le poste de travail par des miroirs fixes ou mobiles.

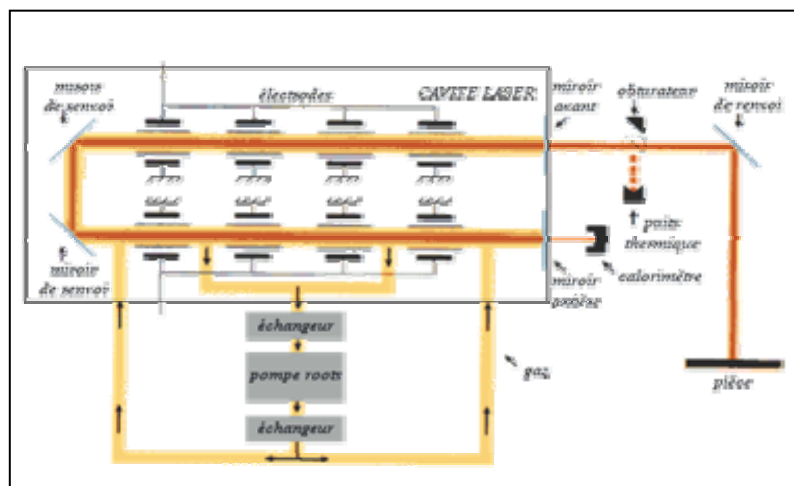


Figure.2.1 Laser  $\text{CO}_2$  à flux axial rapide .

### 2.3.1.2 Les lasers CO<sub>2</sub> à flux transverse

Le mélange gazeux est mis en circulation par une turbine. Il traverse transversalement la cavité où se produit la décharge électrique, puis un échangeur thermique qui le refroidit. Une partie de ce gaz est évacuée à l'extérieur, tandis que du gaz neuf est injecté simultanément. Le faisceau laser traverse plusieurs fois la cavité par réflexions multiples entre les miroirs de renvoi, avant d'être émis par le miroir avant semi transparent.

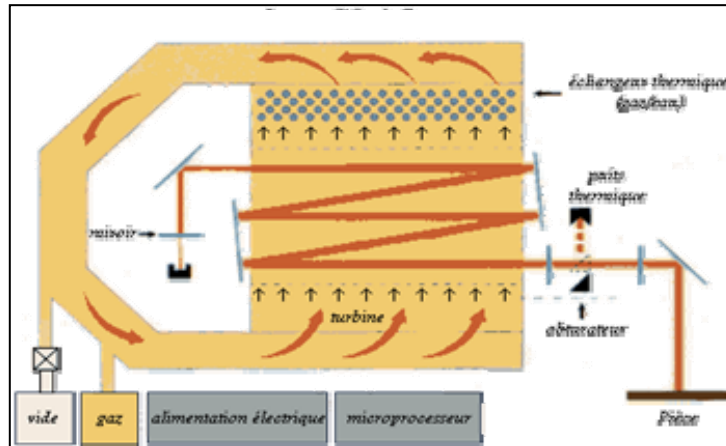


Figure.2.2 Laser CO<sub>2</sub> à flux transverse .

#### Principe

Les atomes sont constitués d'un noyau et d'un ou plusieurs électrons qui gravitent sur des orbites stables. Le principe du laser repose sur le phénomène de pompage par excitation. Ce pompage s'effectue par le passage d'un électron d'une orbite de niveau d'énergie  $E_1$  à une autre orbite d'énergie supérieure  $E_2$  et se fait par absorption d'une quantité d'énergie parfaitement définie. Celle-ci peut provenir d'une excitation électrique, ou d'un flash optique.

Deux types d'émissions laser peuvent alors se produire:

**L'émission spontanée :** Lorsqu'un électron est situé à un niveau excité, il revient naturellement à son état fondamental en libérant un photon d'énergie, c'est l'émission spontanée.

**L'émission stimulée :** Lorsqu'un photon d'énergie  $E$  excite un électron placé sur orbite  $E_2$ , il y a libération d'énergie sous la forme d'un second photon de même énergie et de même phase que le photon incident; il y a alors émission stimulée.

Le milieu actif est placé dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement transparent. Il subit une excitation afin d'obtenir le phénomène de pompage. Lorsque le niveau d'énergie supérieur devient plus peuplé que le niveau inférieur, il y a inversion de population et émission spontanée dans toutes les directions. Lorsqu'un photon rencontre un électron excité, il y a émission stimulée. Le faisceau laser sort de la cavité à travers le miroir partiellement transparent.

### 2.3.2 Les lasers YAG

Plusieurs technologies de laser YAG existent : continus à pompage par lampes, pulsés, continus à pompage par diodes. Ces techniques privilégient la qualité ou la puissance maximale du faisceau pouvant être extraite de la cavité. Les lasers YAG présentent l'avantage, par rapport aux lasers CO<sub>2</sub> de pouvoir utiliser des fibres optiques pour le transport du faisceau.

#### 2.3.2.1 Les lasers YAG continus

Le milieu actif est excité par une ou deux lampes flash émettant en "continu", l'ensemble constituant la chambre de pompage. Il est possible d'assembler plusieurs chambres de pompages et ainsi de réaliser des lasers pouvant aller jusqu'à une puissance de 5000W. L'amplification du faisceau d'énergie s'effectue par allers et retours successifs dans le milieu amplificateur. Le faisceau émis est guidé vers le ou les postes de travail par des miroirs fixes ou mobiles, ou par des fibres optiques.

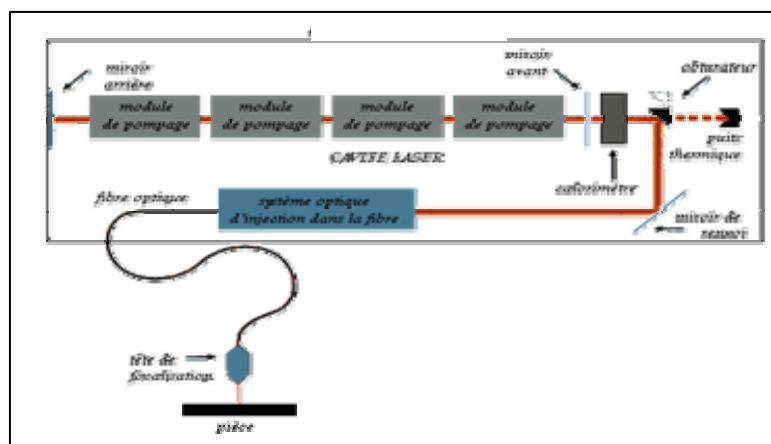


Figure.2.3 Laser YAG continu .

### 2.3.2.2 Les lasers YAG pulsés

Le résonateur et les chambres de pompage sont de conception similaire à celles des lasers YAG continus. L'excitation s'effectue de manière différente. Les lampes flash sont alimentées à des fréquences et des durées d'impulsion variables, parfaitement définies et reproductibles dans le temps. A chaque impulsion électrique correspond l'émission d'une impulsion laser. Un pilotage de l'excitation des lampes flash permet de contrôler le profil temporel de l'énergie émise par l'impulsion laser. Un module de pompage permet la production d'une énergie laser de l'ordre de 50 J pour une puissance moyenne de 500 W.

### 2.3.3 Les lasers excimères

Les lasers excimères sont des lasers à gaz, pulsés, émettant un rayonnement ultraviolet, le terme excimère désigne une molécule constituée de 2 atomes électroniquement excités afin de permettre la réaction chimique. Ces molécules, liant un atome de gaz halogène et un atome de gaz rare, n'existent évidemment pas à l'état naturel. On a donc recours à une décharge électrique très puissante pour réaliser cette réaction qui permet par ailleurs de parvenir à l'état excité à l'origine du rayonnement.

Ces lasers délivrent, en général, un faisceau de section rectangulaire présentant une répartition d'énergie quasi uniforme. Ce faisceau est généralement mis en forme par passage au travers d'un masque.

### Principe

Un système optique concentre l'énergie du faisceau laser, ( $105 \text{ W/cm}^2$  à  $106 \text{ W/cm}^2$ ) et génère un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se resolidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces.

### 2.3.4 Les lasers à diodes

Le faisceau laser est généré par un ensemble d'éléments semi conducteur que l'on appelle barrette de diode laser, d'une taille de  $10 \times 0.6 \times 0.1 \text{ mm}$ , qui est plaquée à l'extrémité d'un circuit de refroidissement.



Les connaissances actuelles permettent d'obtenir des puissances de l'ordre de 30 à 50 Watts. Par empilement de ces barrettes, un faisceau de puissance est alors combiné par superposition optique de plusieurs faisceaux. Cette combinaison s'appelle un « Stack » de diode. En combinant ces stacks, la puissance peut atteindre jusqu'à 6000W. La gamme de longueur d'onde va de 800 à 980nm.

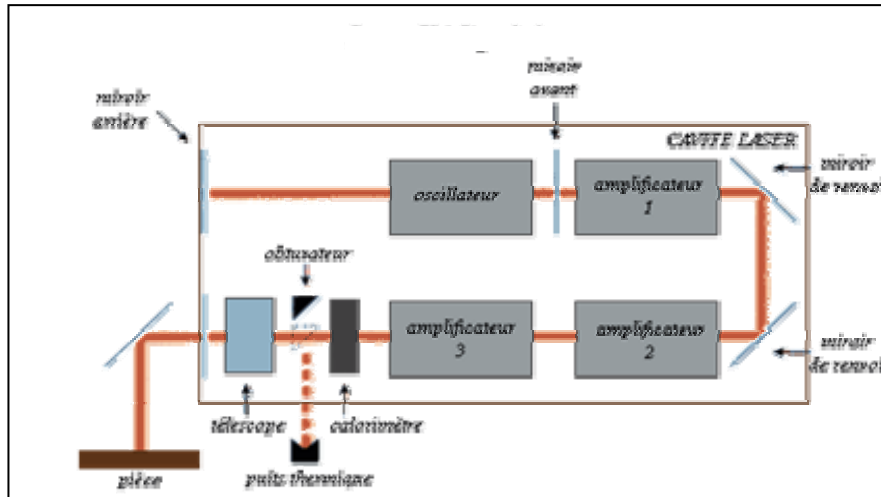


Figure.2.4 Laser YAG pulsés .

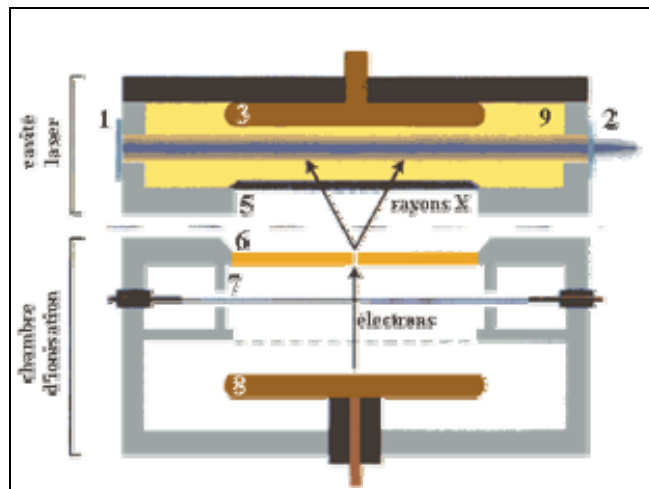


Figure.2.5 Laser excimères .

- |                                  |                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1- miroir arrière.               | 6- cible d'or ou tantale.            |
| 2- miroir avant.                 | 7- anode de la chambre d'ionisation. |
| 3- cathode de la décharge laser. | 8- cathode du canon à électron.      |
| 4- faisceau laser.               | 9- gaz excimère.                     |
| 5- anode de décharge laser.      |                                      |

## 2.4 Caractéristique du soudage des métaux par laser de puissance

### 2.4.1 Introduction

L'assemblage de deux éléments solides par soudage consiste à créer, dans la zone de jonction, des forces de liaison de l'ordre de grandeur des forces cohésion atomique ou moléculaires propres aux matériaux constituant ces éléments. Les métaux et alliages se prêtent particulièrement bien au soudage, en raison de leur pouvoir de diffusion .

La soudure laser se réalise par la fusion locale de la matière au point d'impact du faisceau. Le soudage par laser exige des fortes densités d'énergie, réalisables en travaillant au voisinage du point focal du système optique.

En soudage par laser de puissance, les densités de puissance utilisées sont de l'ordre de  $10^5$  à  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>. Au point d'impact du faisceau avec le matériau, un capillaire rempli de vapeur métallique se crée, autour duquel se forme un bain de fusion, entretenu et déplacé suivant la ligne d'assemblage (Figure 2.6). La matière se refroidit après passage du faisceau, assurant l'assemblage des pièces. Il s'agit du soudage par pénétration appelé « soudage Keyhole » .

Pour des densités de puissances inférieures à  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>, la vaporisation du métal au point d'impact laser matériau n'est pas atteinte et le keyhole ne se crée pas, par conséquence, la fusion du matériau se fait par conduction (diffusion de la chaleur à partir du point d'impact du faisceau).

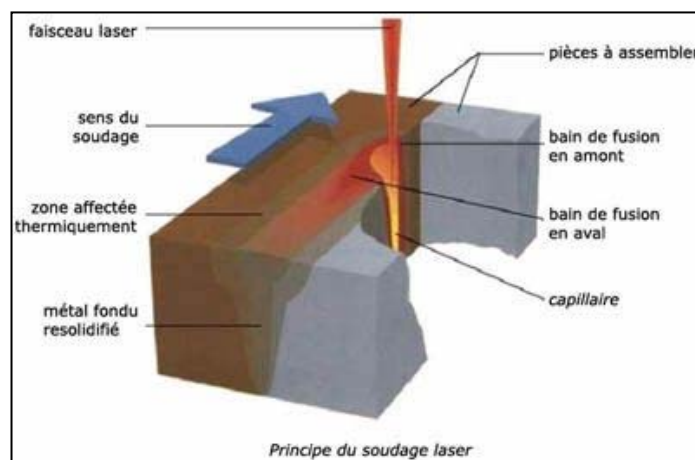


Figure 2.6. Principe du soudage Laser .

## 2.5 Caractérisation du soudage par Keyhole

### 2.5.1 Création du capillaire

Sous l'effet des fortes densités de puissance, un processus rapide de vaporisation du métal au point d'impact du faisceau génère un capillaire de très faible diamètre de profondeur de la pièce. Il s'agit de vapeurs métalliques ionisées à très haute température. Le capillaire ainsi créé, se trouve enveloppé de bain de fusion. La pression de vapeur à l'intérieur de la cavité appelé aussi « keyhole », maintenant l'équilibre avec la pression hydrodynamique du bain de fusion.

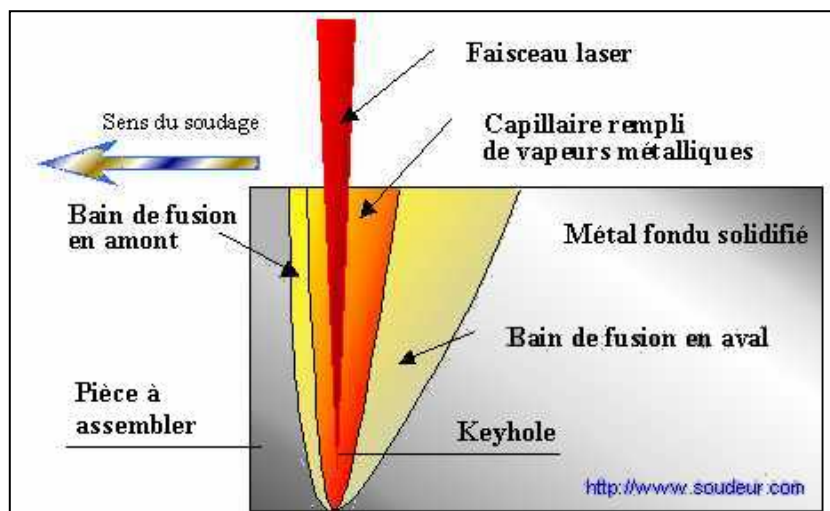


Figure2.7 Formation du capillaire .

### 2.6 Dynamique du Keyhole

Fondamentalement, le keyhole est une structure instable , même en absence de mouvement. A création du bain liquide autour de cette cavité introduite immédiatement des instabilités. Pour comprendre une telle dynamique qui maintient l'équilibre de keyhole, on considère qu'il s'agit d'un équilibre entre les forces qui tendent à son ouverture et celles qui s'opposent à ce mécanisme [8].

La forme type du capillaire peut être caractérisée grâce à des observations effectuées par rayon X . L'idée de base est que le capillaire « keyhole » crée est maintenant ouverte sous l'action de plusieurs termes de pressions. Sur le principe d'équilibre des pressions, Kross [8] a étudié un modèle auto cohérent du capillaire.

Dans le cas d'un keyhole à géométrie simplifiée, l'équilibre thermodynamique est maintenu selon l'équilibre des facteurs de pression suivants [8]:

- $P_g$  = pression hydrostatique.
- $P_{abl}$  = pression de vaporisation = pression d'ablation.
- $P_\gamma$  = pression de tension de surface.
- $P_h$  = pression hydrodynamique.
- $P_l$  = pression de radiation.

Les termes  $P_\gamma$ ,  $P_h$  et  $P_l$  ont tendance à garder le keyhole ouvert tandis que  $P_g$  et  $P_{abl}$  sont des pression de rappel. Tous ces termes dépendent de la profondeur  $z_k$ , et du rayon  $r_k$  du keyhole.

A l'équilibre, pour tout point  $(r,z)$  sur la surface du keyhole [8] :

$$P_{abl} + P_g + P_h = P_\gamma + P_l$$

Comparés à la pression de tension de surface et à la pression de vaporisation les termes  $P_l$  et  $P_g$  peuvent être négligés. Le terme hydrodynamique  $P_h$  devient petit pour des faibles vitesses de soudage, par la suite la balance de pression qui détermine la stabilité du keyhole devient :

$$P_{abl}(T_s(r_k, z_k)) = P_\gamma(r_k)$$

## 2.7 Transfert d'énergie en soudage par keyhole

En soudage métallique, ce sont les électrons de conduction qui interagissent avec les photons du rayonnement laser. L'important flux d'énergie électromagnétique émis par un laser est absorbé par une mince couche superficielle du matériau (une dizaine de nanomètre). L'énergie absorbée est transmise rapidement au réseau atomique.

La zone d'impact faisceau pièce devient alors une source de chaleur extrêmement intense. L'absorption en phase solide est de quelque % pour un rayonnement de 10,6 $\mu$ m, elle est moins de 10% à 1,06 $\mu$ m.

Après, le processus d'absorption s'accélère en phase liquide, certains auteurs notent un couplage pouvant atteindre l'ordre de 40%, d'autres obtiennent des valeurs plus modestes (de

l'ordre de 10%) [6]. Ces écart peuvent s'impliquer par des effets d'oxydation de la surface (d'où l'intérêt d'une couverture gazeuse adéquate en soudage laser), d'ondulation de celle-ci, de polarisation du faisceau (la valeur de la réflectivité est différente selon l'orientation relative du champ électrique de l'onde laser et du plan d'incidence. Pour un faisceau perpendiculaire, la réflectivité est toujours élevée, quel que soit l'angle d'incidence. Pour une polarisation parallèle au plan d'incidence, la réflectivité décroît à mesure que l'angle d'incidence augmente et dans ces conditions le couplage entre faisceau et le substrat s'accroît, c'est-à-dire que l'absorption augmente).

Après liquéfaction, la température de surface continue de croître rapidement. Une vaporisation partielle apparaît après intégration de l'énergie latente de transformation. La vapeur ainsi formée est partiellement ionisée par effet de thermo-ionisation.

Les électrons libres ainsi formés absorbent le rayonnement par effet *Bremstrahlung* inverse. La création du capillaire s'accompagne d'un plasma à la surface du bain de fusion.

Ce plasma, composé de vapeurs ionisées, est très absorbant vis-à-vis du faisceau laser à CO<sub>2</sub> (jusqu'à 60% de l'énergie incidente). L'énergie absorbée est ensuite transmise aux milieux environnants, et constitue une zone secondaire de chauffage.

Le comportement du plasma est fortement dépendant de la densité d'énergie et de la couverture gazeuse. La présence d'un gaz ambiant, choisi le plus souvent pour ses propriétés plasmagènes, favorise le phénomène.

Pour des conditions correctes de mouvement relatif faisceau/pièces, la cavité en pénétration profonde se maintient en équilibre dynamique à l'intérieur du métal, déplaçant une zone de fusion en amont, en aval, et à la périphérie du point d'impact, et une zone de solidification du bain dans le sillage.

La pression de la vapeur dans la cavité soulève le métal en fusion qui est maintenu en un bourrelet superficiel grâce à une combinaison des efforts de gravité, de viscosité et de tension superficielle. Au sein même de la cavité, les forts gradients de température et de pression communiquent à la matière fluide des mouvements puissants qui s'accompagnent d'importants transferts de chaleurs. Il en résulte des réactions d'excitation d'ionisation des

atomes de vapeur dont les chaleurs latentes sont beaucoup plus importantes que celles liées aux changements de phase survenant dans les zones de soudures habituelles [6].

## 2.8 Formation du cordon et propriétés

Le déplacement relatif faisceau/pièce maintient une zone en amont, en aval et à la périphérie du capillaire (keyhole), l'ensemble se déplace le long du joint à souder et le métal se resolidifie derrière le passage du faisceau assurant la formation du cordon de soudure.

La conjugaison des réactions d'excitations et d'ionisation des atomes de vapeur, les variations intenses de température sur des distances très petites engendre la formation d'un cordon de rapport entre profondeur et largeur élevé.

Comparé aux procédés classiques, la zone affectée thermiquement en soudage laser est très limitée. La brièveté des processus intervenant pendant le cycle du soudage par laser, associées à des vitesses de refroidissement élevées ( $10^{\circ}\text{C/s}$ ), donne naissance à des microstructures à grains extrêmement fins. Ceci procure aux cordons de soudure des propriétés métallique comparable a celles du métal de base.

Contrairement aux procédés conventionnels, le procédé de soudage laser ne réalise pas la fusion des matériaux à souder par transfert thermique de la surface vers l'intérieur de la pièce mais bénéficie de la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques. La formation de ce capillaire permet donc un transfert direct de l'énergie au cœur de la matière, permettant ainsi l'obtention de cordons de soudure beaucoup moins larges que pénétrants.

## 2.9 Soudabilité laser des métaux

Le soudage des métaux est des premières applications industrielles des lasers de puissance. La capacité de diriger une impulsion de rayonnement intense vers une cible distante en employant seulement un système optique a été rapidement perçue comme une technologie favorable.

En conséquence, le monde industriel a connu un développement rapide des techniques de soudage par laser qui a été adopté en tant que procédé standard d'assemblage des métaux

sous certaines conditions industrielles [6]. La soudabilité laser des métaux ne dépend pas uniquement des propriétés physiques, chimiques et métallurgiques des matériaux, mais aussi des paramètres du procédé.

### 2.10 Paramètres du soudage par laser et leurs effets

Le soudage par faisceau laser dépend d'un certains nombre de paramètre liés au faisceau laser (faisceau + système optique), à la protection gazeuse, et au matériau. Une bonne connaissance des ces paramètres, de leur rôle, et de leurs influences respectives est à la base d'une bonne maîtrise du procédé du soudage par laser.

Nous considérons que les principaux paramètres liés au procédé laser qui nous permettent d'évaluer et d'interpréter [6] des résultats de soudage par laser sont :

- La puissance laser fournie par la source et le système optique.
- La vitesse du soudage (vitesse relative pièce/faisceau)
- La position et la taille de la tache focale au point d'impact faisceau/pièce
- La nature et le débit de la couverture gazeuse.

Pur souder un matériau sur une épaisseur donnée, une combinaison de ces paramètres doit permettre d'obtenir un cordon de profil bien déterminé. La maîtrise et la connaissance de l'influence de ces paramètres nécessite de faire varier chacun de ces paramètres en gardant les autres constants.

Selon les référence citées du soudage par laser, on doit s'intéresse à l'évolution de la profondeur de pénétration, la largeur du cordon, la formation des défauts métallurgiques, ainsi que les propriétés mécaniques du cordon avec ces différentes paramètres.

Selon la référence , la profondeur de pénétration et reliée à la puissance laser par une relation de forme :  $\delta = \mathbf{KP}^m$  ou  $\delta$  est la profondeur de pénétration, P est la puissance laser, k et m sont en fonctions de la nature du matériau.

Corrélativement la largeur du cordon déterminée au sommet de celui-ci augmente. La puissance laser et la vitesse du soudage déterminent l'énergie et la manière dont elle est déposée selon la ligne de fusion, la profondeur de pénétration, de la largeur du cordon et de la zone affectée thermiquement.

Pour les vitesses faibles, l'énergie n'est plus transférée directement. Pour l'essentiel, c'est par le biais du plasma par effet de convection et de rayonnement que s'effectue le transfert, comme pour une soudure conventionnelle.

La position et la taille de la tache focale jouent aussi un rôle important lors d'une opération de soudage par laser. Le diamètre de la tache focale dépend du système optique utilisée, donc une fois le système de focalisation est défini il sera conservé pour toute l'opération du soudage.

Par contre pour la position de la tache focale, il est préférable qu'elle soit placée légèrement à l'intérieur du matériau à souder, pour obtenir des meilleures performances.

Il est important de savoir qu'une faible variation du diamètre de la position de la tache focale modifié largement la surface d'impact faisceau/pièce ce qui produit avec une variation de la densité de puissance incidente et peut provoquer une perte ou une augmentation de pénétration [8].

Certaines études retiennent une position de la tache focale au tiers de la pénétration visée [8].

Enfin la couverture gazeuse joue un rôle protecteur lors de la solidification du métal fondu d'une part contre l'oxydation et d'autre part contre la formation des porosités et des inclusions.

Un second rôle est d'éviter la formation de plasma dans la vapeur au-dessus de la zone de soudure, elle protège ainsi la transmission du faisceau et assure un bon couplage faisceau/matériau.



On utilise généralement comme protection gazeuse, les gaz inertes (argon et hélium), ou dans certains applications les gaz neutres tel que l'azote. La couverture gazeuse peut être mono constituant où un mélange de gaz bien adapté.

Dans le cas de soudage par laser CO<sub>2</sub>, l'hélium est le gaz de référence, grâce à son potentiel d'ionisation élevé (24,5 eV) et à sa grande conductibilité thermique, il limite la formation de plasma, et aucun problème métallurgique dans le cordon du à ce gaz est à craindre.

Pour le même procédé de soudage c'est-à-dire, le soudage par laser CO<sub>2</sub>, les performances de l'argon sont moins bonnes que celles obtenues avec l'hélium. Avec un potentiel d'ionisation (15,7 eV) plus faible que celui de l'hélium, l'argon peut provoquer un plasma absorbant.

L'hélium maintient la transparence du plasma, alors que l'argon peut introduire un plasma absorbant. Outre la nature de la couverture gazeuse, le débit de celui-ci influence aussi la profondeur de pénétration et le profil du cordon. Dans le cas de l'hélium, la profondeur de pénétration et le mouillage en surface sont identiques que soit le débit. Cependant, il peut provoquer un cordon plus étroit, plus bombé, qui s'accompagne dans certains cas des morsures (manque local de métal situé sur les bords d'un cordon de soudure) et de caniveaux.

Avec l'argon, la profondeur de pénétration augmente avec le débit. Pour des faibles débits, le plasma devient très absorbant ce qui provoque une chute de pénétration. A grands débits le jet de gaz souffle le bain de fusion entraînant une qualité médiocre de la soudure (irrégularités, caniveaux, bourrelets,..)[7].

Les mélanges hélium/argon, ont comme intérêt leur neutralité métallurgique. En optimisant la teneur en hélium on peut aboutir à des performances voisines de l'hélium avec un prix de revient sensiblement inférieur.

Les gaz de soudage utilisés :

- Argon : bons résultats (jusqu'à 2kW avec un laser CO<sub>2</sub>).
- Hélium : utilisé pour les fortes puissances (>5kW).

- Hélium+Argon : Bon compromis.
- Azote : réduit le taux de porosité dans les inox, puissances limitées à 2kW.

### 2.11 Optimisation des paramètres du soudage par laser

L'optimisation des paramètres liés au procédé du soudage par laser définit les conditions du soudage. Généralement l'optimisation se fait en relation avec la qualité de soudage recherchée. La profondeur de pénétration, la section du cordon, peuvent être obtenus avec différentes combinaisons de ces paramètres. L'analyse métallurgique et les contrôles mécaniques permettent de valider les paramètres optimisés.

### 2.12 Avantages et inconvénients du soudage par laser

Le soudage par laser est un procédé fiable et rapide, il présente un taux de rentabilité élevé, il permet un assemblage des pièces sans reprise ultérieure et avec faibles déformations. Les pièces à assembler sont fondues localement sous l'effet du rayon laser. Le soudage laser s'effectue généralement sans métal d'apport. Toutefois, on peut conférer à la soudure la composition et la structure désirées au moyen d'une substance additionnelle.

L'avantage du soudage laser par rapport aux procédés conventionnels est surtout la finesse de la soudure. Ceci permet d'améliorer seulement l'aspect esthétique mais également d'éviter une dégradation thermique grâce à l'échauffement localisé.

#### 2.12.1 Avantages du procédé

- Vitesses du soudage élevées, supérieures au m/min.
- Faibles déformations.
- Zone affectée thermiquement réduite (Z.A.T).
- Flexible, précis et propre.
- Possibilité du soudage par transparence.
- Soudage autogène possible.
- Soudage de joint d'accès difficile.

### 2.12.2 Contraintes du procédé

- Investissement lourd.
- Préparation soignée du bord.
- Positionnement précis du faisceau.
- Sécurité spécifique des installations.
- Pas de soudage manuel.

### 2.13 Conclusion

Le soudage laser fait l'objet de recherches importantes sur le plan international, en effet, l'industrie de pointe fait appel aux techniques avancées (aéronautique, aérospatial, microélectronique, automobile) et le soudage laser est le plus indiqué.

Le soudage des métaux par laser de fortes puissances repose sur le principe de l'effet keyhole. Il s'agit d'un mécanisme qui fait encore l'objet de recherche afin de mieux comprendre les mécanismes, les caractéristiques et ses liens avec différents paramètres du procédé.

D'où l'utilité de notre travail, on va essayer avec une approche numérique et en tenant compte des hypothèses simplificatrices de prévoir l'évolution des dimensions du cordon de soudure (largeur, profondeur) obtenu par soudage laser CO<sub>2</sub> pour deux types d'alliages utilisés en aéronautique, l'alliage de magnésium WE43 et l'alliage d'aluminium AU4G /2017A en fonction des paramètres suivantes :

- Puissance incidente.
- Vitesse de déplacement (vitesse de soudage).
- Energie linéique qui est le rapport (Puissance incidente/Vitesse de déplacement).

## **CHAPITRE 3**

### **MODELISATION DU PROBLEME**

#### 3.1 Introduction

Nous proposons, dans ce chapitre, d'apporter quelques éléments théoriques destinés à confirmer quantitativement (ou non) et à interpréter physiquement les diverses observations expérimentales effectuées dans le soudage par laser.

#### 3.2 Modèle proposé

##### 3.2.1 Description du modèle

Etant donnée l'énergie nécessaire pour les opérations de soudage, les sources laser CO<sub>2</sub> sont principalement utilisées. La figure 3.1 illustre les phénomènes physiques, principalement du point de vue thermique, qui interviennent dans le régime du soudage. Ce dernier est caractérisé par l'apparition d'un capillaire de vapeurs métalliques ionisées ou « keyhole », que l'on observe lorsque l'intensité sur la pièce est supérieure à 10<sup>6</sup> w/cm<sup>2</sup>. La formation et les comportements de cette cavité de plasma au sein du matériau doivent être connus pour espérer interpréter les phénomènes physiques mis en jeu. Pour de telles densités de puissance l'énergie absorbée par le matériau ne peut être évacuée uniquement par conduction à l'intérieur de la pièce, il se crée alors un équilibre hydrostatique entre la pression à l'intérieur de la cavité et les pressions générées par le bain fondu. Le faisceau est absorbé sur la totalité de la profondeur de pénétration et perd progressivement son énergie. Au fond du capillaire, elle est trop faible et n'assure plus la formation du plasma : la pénétration se stabilise. Le plasma joue alors un rôle d'interface entre le faisceau et la cible : il transmet en particulier l'énergie emmagasinée sous la forme de rayonnements ultraviolets et visibles qui sont mieux absorbés par les matériaux métalliques. Le couplage faisceau matière est amélioré. Devant la progression du capillaire, le métal solide fond et s'écoule autour de celui-ci libérant le passage à la colonne de plasma ; il se refroidit alors à l'arrière et forme le cordon de soudure.

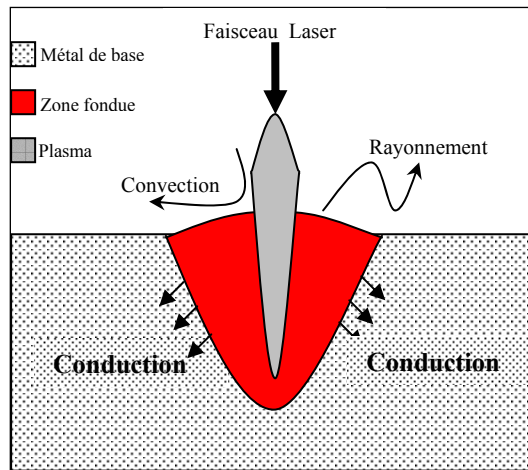


Figure 3.1 Phénomènes thermiques

Etant donnée la disparité des résultats théoriques concernant le soudage par laser, il est pour l'instant illusoire de vouloir établir un modèle faisant intervenir toute la complexité des mécanismes de transfert de chaleur et de matière mis en jeu dans un tel processus. Un tel modèle, basé sur la résolution de systèmes couplés d'équation aux dérivées partielles, ne pourrait, en effet, être validé de façon fiable ne serait-ce qu'en raison des incertitudes concernant les données physiques, l'impossibilité de maîtriser les conditions aux limites, le manque de données concernant l'influence de la formation de vapeurs métalliques. Par ailleurs, l'utilité de ce type de modèle en vue d'une intégration ultérieure dans un système expert industriel est aussi discutable.

Ces deux éléments nous ont amené à définir un modèle de transfert simple qui permette de prévoir avec suffisamment de précision les conditions optimales du soudage en fonction des principaux paramètres : vitesse de soudage, puissance laser incidente, géométrie du faisceau laser, nature du matériau à traiter. Le modèle est conçu de façon à pouvoir être directement amélioré grâce à l'introduction de nouvelles données expérimentales.

### 3.3 Position du problème et hypothèse

Le modèle proposé résulte d'un bilan thermique de la pièce à souder au voisinage immédiat de la ligne de soudure. La pièce est divisée en trois régions (Figure 3.2). Le capillaire, directement influencé par le faisceau incident, il est supposé être de forme cylindrique, le diamètre  $d$ , et rempli de gaz résultant de l'émission de vapeurs métalliques. La température de ce plasma est uniforme et de l'ordre de 13000 K. le modèle ne tient pas

compte de l'atténuation du faisceau par le plasma, la complexité des processus physiques rentrant en jeu, le manque de données concernant ce problème est son influence sur la taille du capillaire n'étant pas à l'heure actuelle l'objet de données suffisamment fiables.

La zone liquide contenant du métal en fusion dont la température sera la moyenne arithmétique entre les températures de fusion et de vaporisation. Le diamètre  $D$  de cette zone liquide, que l'on supposera également de forme cylindrique, dépend de la vitesse de soudure, du diamètre du capillaire et des propriétés physiques du matériau. La puissance du faisceau incident pourra ultérieurement être introduite dans le modèle pour l'évaluation de ce paramètre, mais des premières mesures effectuées sur l'acier [8] tendent à démontrer que cette puissance joue un rôle secondaire. L'influence des mouvements convectifs dans la zone liquide est négligée.

La partie solide qui constitue tout le reste de la plaque à souder. Cette partie solide est soumise à une source linéaire de chaleur, de diamètre  $D$  et de température égale à la température de fusion du métal.

Etant donné le but principal du modèle (facilité d'intégration à un processus industriel), il faut qu'il soit facilement résolvable sur des petites machines (à la limite, du type calculatrice programmable) : c'est pourquoi les propriétés physiques sont supposées constantes pour chaque phase. De plus les données sont là encore trop disparates et manquent de fiabilité. Toutes fois, une étude de ces paramètres sera effectuée pour en cerner l'importance.

Enfin, les déperditions de chaleur par convection naturelle ou forcée et celle par rayonnement entre la plaque et l'air ambiant ne sont pas négligées. On va évaluer ces déperditions après par une simulation sur le logiciel de calcul COMSOL. Nous allons prendre en compte certaines hypothèses simplificatrices pour la convergence notre modèle.

Le rayon moyen de la zone liquide est modélisé suivant l'approche de M. Davis et coll. [7]. La forme de cette zone est en réalité de forme elliptique, mais l'objectif étant surtout d'évaluer son volume pour en déduire l'énergie nécessaire de sa formation, il suffit de prendre un diamètre équivalent. D'éventuelles nouvelles données concernant ce problème pourront être ultérieurement introduites dans le modèle sans difficulté majeure.

Le diamètre de la zone fondue est donné par l'équation :

$$D = \frac{8a_s}{V_s} \exp \left[ \frac{\left\{ K_s (T_f - T_0) \operatorname{Ln} \left( \frac{dV_s}{8a_s} \right) - 0.57772 K_l (T_v - T_f) \right\}}{K_s (T_f - T_0) + K_l (T_v - T_f)} \right] \quad (1)$$

Dans laquelle  $a_s$ , est la diffusivité thermique du solide,  $V_s$  la vitesse de soudage,  $\lambda_s$  et  $\lambda_l$  désignant les conductibilités thermiques du solide et du liquide.  $T_f$ ,  $T_v$  et  $T_0$  sont, respectivement, les températures de fusion, de vaporisation et initial de la pièce à souder.

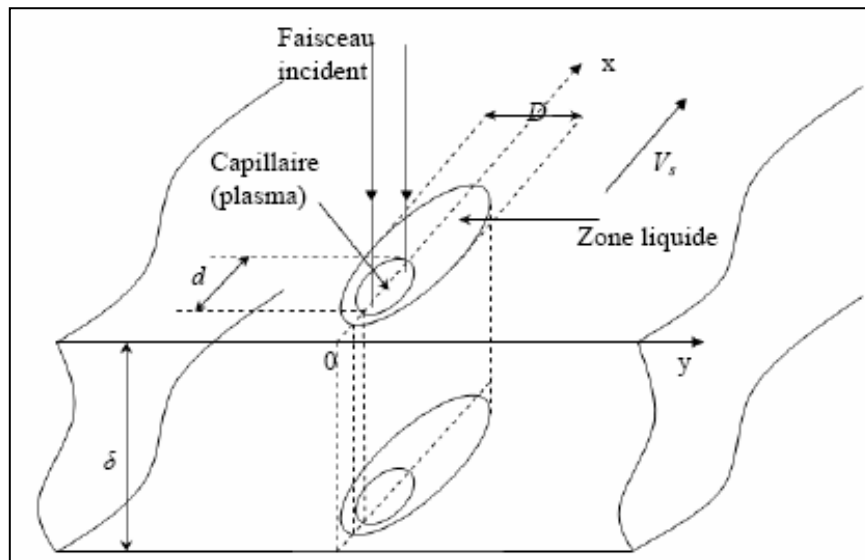


Figure. 3.2 Schématisation de la soudure laser.

### 3.3 Bilan d'énergie

Considérant une forme simplifiée de notre problème (figure 3.3), les volumes élémentaires considérés sont :

$$V.d.\delta \quad \text{Pour l'état gaz.}$$

$$V \left[ \left( (D-d).\delta + \frac{\pi D^2}{8} \right) \right] \quad \text{Pour l'état liquide.}$$

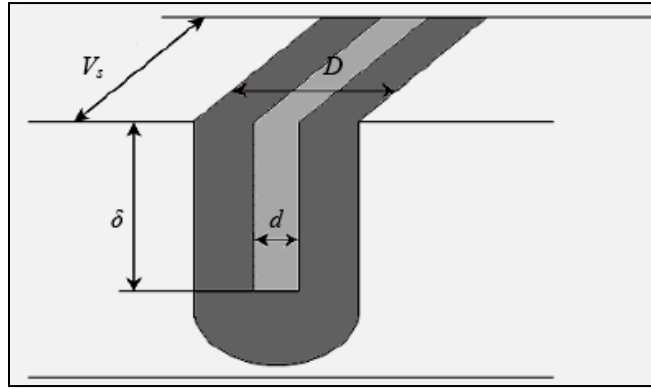


Figure.3.3 Forme simplifiée de la zone du soudage.

Le bilan énergétique du métal soumis au faisceau incident s'écrit, compte tenu des hypothèses faites :

$$P_{\text{incidente}} = P_{\text{absorbé}} + (P_{\text{perd-conv}} + P_{\text{perd-ray}}) \quad (2)$$

$$P_{\text{absorbé}} = P_s + P_L + P_g \quad (3)$$

La puissance transmise au capillaire est donnée par :

$$P_g = V_s d \delta \left[ \rho_s C p_s (T_f - T_0) + H_f \rho_s + \rho_l C p_l (T_v - T_f) + H_v \rho_l + \rho_g C p_g (T_p - T_v) \right] \quad (4)$$

Où  $\rho_s, \rho_l, \rho_v$  sont respectivement les densités des phases à l'état solide, à l'état liquide et à l'état gaz.

La puissance  $P_l$  transmise à la zone liquide est donnée par :

$$P_l = V_s \left[ (D-d) \delta + \frac{\pi D^2}{8} \right] \left[ \rho_s C p_l (T_f - T_0) + H_f \rho_s + \rho_l C p_l \frac{T_v - T_f}{2} \right] \quad (5)$$

enfin, la puissance évacuée par conduction dans le solide est écrite en supposant que celui-ci est soumis à une source linéaire de chaleur de diamètre  $D$  et de température égale à la température du front de fusion, soit  $T_f$ . ce possède une solution analytique qui est (6, 8) :

$$P_s = \frac{2\pi K_s (T_f - T_0) \delta \exp\left(\frac{V_s \xi}{2a_s}\right)}{K_0 \left(\frac{V_s r}{4a_s}\right)} \quad (6)$$



Où  $\xi$  est défini par  $(x - V_s t)$ ,  $x$  étant la distance à partir du bord de la plaque et  $t$  le temps nécessaire pour parcourir la distance  $x$  à la vitesse de soudage. On a par ailleurs :

$$r = \sqrt{\xi^2 + y^2}$$

Un changement d'origine en  $\xi=0$  donne

$$P_s = \frac{2\pi K_s (T_f - T_0) \delta}{K_0 \left( \frac{V_s D}{4a_s} \right)} \quad (7)$$

$K_0 \left( \frac{V_s D}{4a_s} \right)$  est la fonction de Bessel de deuxième espèce et d'ordre 2, qu'elle est facile à programmer à l'aide de polynômes.

Ce pendant en va utiliser une modélisation simplifiée du terme de conduction  $P_s$  :

$$P_s = \frac{2\pi K_s T_v \delta}{Ln \left( \frac{8a_s}{1.78 V_s d} \right)} \quad (8)$$

L'expression (8) est obtenue en considérant que l'argument de la fonction Bessel équation (7) est petit et en supposant aussi que la source de chaleur linéique est à la température  $T_v$  (au lieu de  $T_f$ ) et de diamètre  $d$  (au lieu de  $D$ ).

Les relations précédentes permettent de déduire la profondeur de soudure en fonction de la puissance  $P_i$  du faisceau incident, de la vitesse de soudage et donc de l'énergie linéaire de soudage définie par rapport  $\frac{P_i}{V_s}$ . Notons que l'équation (3),  $P_a = \eta P_i$ ,  $\eta$  étant le coefficient d'absorption du faisceau incident.

La modélisation de ce coefficient pourra elle aussi être affinée en fonction des progrès réalisés dans l'étude de l'absorption du rayonnement incident par le plasma et les zones solide et liquide.

### 3.4 Modélisation sur COMSOL

#### 3.4.1 Présentation du problème

Dans la partie précédente on a dressé un bilan énergétique du métal soumis au faisceau incident. On remarque bien qu'il est nécessaire de calculer les différents termes de puissance perdus que se soit par conduction ou par convection. Compte tenu de la complexité de notre problème de soudage on ne peut pas déterminer cette perte de puissance par un calcul simple de rayonnement et de convection.

Nous considérons l'impact d'un faisceau laser sur une tôle d'alliage de magnésium. Nous travaillons sur un modèle à deux dimensions. La répartition du flux laser surfacique est gaussienne (figure 3.4).

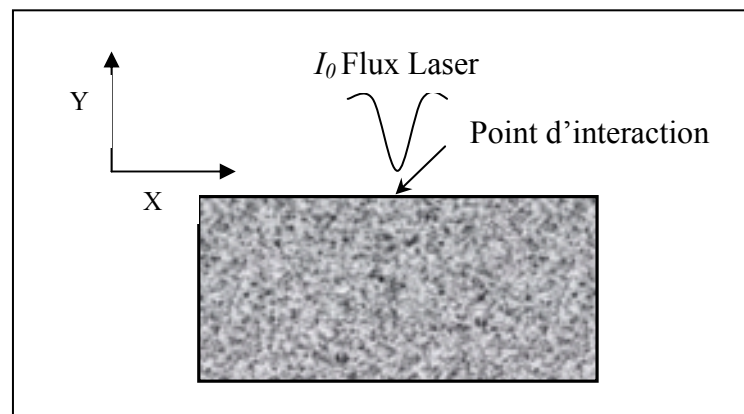


Figure 3.4 Interaction laser/tôle

Le flux laser  $I_0$  est donné par la relation suivante :

$$I_0 = A_{br} \frac{P_i}{\sqrt{\pi} R_F} \exp\left(-\frac{x^2}{R_F^2}\right) \quad (9)$$

Avec  $P_i$  la puissance crête du laser,  $R_F$  le rayon du faisceau focalisé sur la pièce et  $A_{br}$  le facteur d'absorption au rayonnement laser qui dépend de la température, et du position de la tache focale par rapport au point d'impact [8].

Comme on l'a dit au paravent (§ 3.2.1) on s'intéressera uniquement au transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement.

### 3.4.2 Transferts thermiques

Nous utilisons l'équation de la chaleur avec addition d'un terme supplémentaire pour la prise en compte des chaleurs latentes de fusion et de vaporisation. Celles-ci sont introduites comme de sources.

$$\rho(Cp + D(Hv + Hf))\frac{dT}{dt} + \vec{\nabla} \cdot (-k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (10)$$

Où  $\rho$  dénote la masse volumique,  $Cp$  la capacité thermique massique,  $T$  la température,  $k$  la conductivité thermique qui sont constantes dans chaque phases,  $\Delta Hf$  et  $\Delta Hv$  les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation,  $D$  un pulse normalisé autour de la température de transition  $T_{trans}$ .  $D$  est de forme gaussienne [8] :

$$D = \frac{\exp\left(\frac{-(T - T_{trans})^2}{(\delta T)^2}\right)}{\sqrt{\pi(\delta T)^2}} \quad (11)$$

### 3.4.3 Conditions aux limites

Pour résoudre le problème de transfert de chaleur, il faut tenir compte des conditions aux limites suivantes :

- En face supérieure (figure 3.4) :

$$-k(T)\vec{\nabla}T \cdot \vec{n} \cdot \vec{n} = I_0 + h_g(T - T_{amb}) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_{amb}^4) \quad (12)$$

- En face inférieure :

$$-k(T)\vec{\nabla}T \cdot \vec{n} = h_g(T - T_{amb}) \quad (13)$$

- Sur les bords :

$$T = T_{amb} \quad (14)$$

Avec  $h_g$  coefficient d'échange convectif,  $I_0$  flux laser surfacique,  $\sigma$  La constante de Stefan et  $\varepsilon$  l'émissivité.

### 3.4.4 Facteurs d'absorption

Pendant un procédé du soudage laser par keyhole, une température suffisamment haute est atteinte pour ioniser la vapeur métallique dans le keyhole, pourvu que ce plasma absorbe efficacement le rayonnement laser.

La modélisation du comportement du plasma durant le procédé de soudage est son influence sur l'absorption sont d'une importance cruciale dans ce modèle. Selon le travail de Nicolas Pierron [9], le coefficient d'absorption ( $A_{br}$ ) peut être calculer théoriquement en fonction de la température et le coefficient de Fresnel pour une polarisation parallèle ou perpendiculaire.

Le facteur d'absorption pour une polarisation perpendiculaire est donné par :

$$A_{per} = 1 - \frac{(n^2 + k^2) - 2n \cos \theta + \cos^2 \theta}{(n^2 + k^2) + 2n \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (15)$$

Le facteur d'absorption pour une polarisation perpendiculaire est donné par :

$$A_{par} = 1 - \frac{(n^2 + k^2) \cos^2 \theta - 2n \cos \theta + 1}{(n^2 + k^2) \cos^2 \theta + 2n \cos \theta + 1} \quad (16)$$

Le facteur d'absorption  $A_{br}$  de l'équation (9) est donné par la moyenne du facteur d'absorption pour une polarisation perpendiculaire  $A_{per}$  et facteur d'absorption pour une polarisation parallèle  $A_{par}$  :

$$A_{br} = \frac{1}{2} (A_{per} + A_{par}) \quad (17)$$

Où  $\theta$  est l'angle d'incidence du faisceau laser par rapport à la surface,  $n$  et  $k$  sont respectivement, les indices de réfraction et d'absorption, qui sont calculés comme suit [9] :

$$n^2 = \frac{1}{2} (\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1) \quad (18)$$

$$k^2 = \frac{1}{2} (\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1) \quad (19)$$

Où  $\varepsilon_1$  est la partie réelle et  $\varepsilon_2$  la partie imaginaire de la permittivité électrique complexe, d'après Nicolas Pierron [9], elles sont données par :

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)} \quad (20)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Gamma \omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)} \quad (21)$$

Où  $\omega_p$  la fréquence du plasma du matériau, en négligeant sa variation avec la température, on peut la calculer comme suit [9] :

$$\omega_p = \frac{4\pi n_e e^4}{m^*} \quad (22)$$

Où  $n_e$  est la densité d'électron,  $e$  la charge d'électron,  $m^*$  la masse effective d'électron,  $\omega$  fréquence circulaire du laser et  $\Gamma$  fréquence de collision des électrons, qui est proportionnelle avec la température. Le modèle de Debye considère le comportement de électrons libres comme un gaz Fermi. On peut déduire la loi Wiedermann-Franz (équation (23)) [9].

$$\sigma = \frac{k}{LT} \quad (23)$$

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right) \quad (24)$$

Où  $L$  est le nombre de Lorentz,  $\sigma$  la conductibilité électrique,  $k$  la conductibilité thermique et  $k_B$  la constante de Boltzmann. On considère que la collision électron - photon est majoritaire [9] :

$$\Gamma = \Gamma_{ep} = \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2}{\sigma} \quad (25)$$

Finalement on obtient la relation (26) :

$$\Gamma = \frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 L}{k_{Phase}} T_S \quad (26)$$

Où  $\varepsilon_0$  est la constante diélectrique,  $T_s$  la température de surface et  $k_{phase}$  la conductibilité thermique de chaque phase.

### 3.4.5 Rayon de la tache focale :

Pour un faisceau gaussien équation (9), le rayon de la tache laser à une profondeur donnée «  $z$  » est donné par l'équation (27) :

$$r = r_{pf}^2 \left( 1 + \frac{(z - z_{pf})^2}{\left( \frac{\pi r_{pf}^2 n}{\lambda_L} \right)^2} \right) \quad (27)$$

Où  $r_{pf}$  est le rayon de la tache focale,  $z_{pf}$  position de la tache focale,  $\lambda_L$  longueur d'onde du rayonnement laser et  $n$  l'indice de réfraction du milieu où se propage le rayonnement.

Le rayon de la tache focale dépend de l'optique de focalisation et il peut être calculé à partir de l'expérience suivante [8] :

$$r_{pf} = 1.22 \lambda_L \frac{F}{D} (2M + 1) \quad (28)$$

Où  $F$  est la focale de l'optique de focalisation,  $D$  le diamètre du faisceau laser sur l'optique de focalisation et  $M$  est le nombre de mode du faisceau laser.

## 3.5 Méthode numérique

### 3.5.1 Introduction

Les équations gouvernant le phénomène thermique en soudage, sont des équations différentielle aux dérivées partielles (voir § 3.4.2) de type non linéaire, cela rend la résolution de ces équations très complexe. Donc on fait appel aux méthodes numériques, en choisissant la méthode qui convient mieux le problème à traité.

Le principe des méthodes numériques est de remplacer le système d'équations différentielles complexes par un système d'équations algébriques discrétisés. Pour obtenir un système discrétisé, nous sommes amené à subdiviser le domaine d'études.

Il existe plusieurs méthodes pour discrétisé le système d'équations différentielles qui sont :

- La méthode des éléments finis : recommandée pour la résolution des problèmes à géométrie complexe.
- la méthode des différences finies : vu la facilité de sa mise en œuvre cette méthode est recommandée dans le cas des problèmes simples.
- La méthode des volumes finis : elle a pour avantage principal, le respect rigoureux des équations de conservation, non seulement de façon globale et pour des points suffisamment resserrés, mais aussi pour chaque volume du maillage quelle que soit sa forme.

### 3.5.2 Descriptif de la méthode numérique utilisée par le logiciel COMSOL

Le code « COMSOL » c'est un code de modélisation et simulation de tous phénomènes physique qui peuvent être écrites sous forme d'équations différentielles. La méthode utilisée par le code pour résoudre les équations différentielles est la méthode des éléments finis, qui est une procédure numérique pour la résolution des équations différentielles de physique et de l'ingénieur. Cette méthode est née en industrie aérospatiale dans les années quarante. C'est en 1956, Turner, Clough, Martin et Topp qui ont introduit le concept d'éléments finis [10].

Les sciences de l'ingénieur (mécanique des fluides et solides, thermique, etc.) permettent de décrire le comportement des systèmes physiques grâce à des équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre efficacement ces équations. Elle utilise une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques [10].

Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur.

Le concept fondamental de la méthode des éléments finis (MEF) est que n'importe quel domaine de quantité comme la pression, la température, ou le déplacement, peut être approximé par un modèle discret composé des fonctions continues définies sur un nombre fini des sous domaines [10].

### 3.5.3 Schéma du calcul numérique

L'organigramme du calcul numérique du modèle présenté ci-dessous se résume par le schéma de la figure 3.5.

Tout d'abord, on introduit les paramètres du procédé tels que les caractéristiques du faisceau laser (la longueur d'onde, le mode, la taille du faisceau,..), la puissance laser, la vitesse du soudage, l'optique de focalisation (longueur focale, diamètre du faisceau avant focalisation, ..) et la position de la tache par rapport à la pièce à souder.

Après l'introduction des données dont on a besoin, on définit la géométrie (pièce à souder), en introduisant les dimensions. Ensuite on choisit le module à utiliser à partir de la bibliothèque des modules COMSOL tout en choisissant le type de l'élément voulu ainsi que le mode de l'analyse (temporelle, stationnaire, paramétrique....), dans notre travail puisque il s'agit du soudage donc on prend le module (General heat transfert).



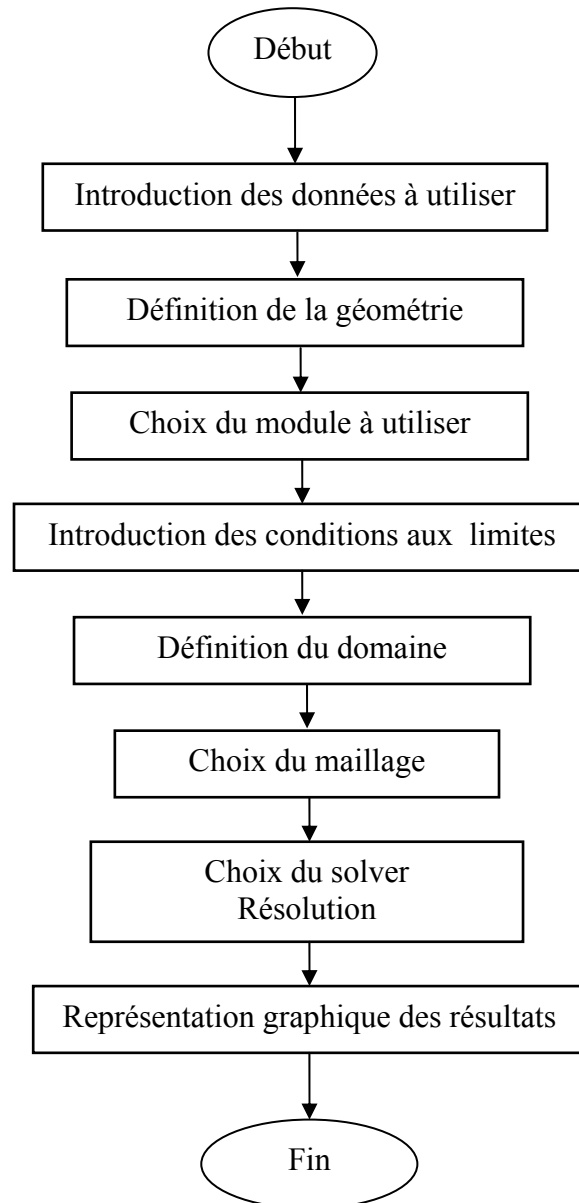


Figure 3.5 Organigramme du calcul

Une fois la géométrie et le mode d'analyse sont définis on procèdera à l'introduction des conditions aux limites choisies (voir §3.4.3). Ensuite on introduit les différentes propriétés du matériau utilisé tels que (la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la densité, les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation, ...).

La dernière étape est de choisir le type de maillage et le solveur qui convient notre problème, enfin on représentera les résultats obtenus graphiquement.

## 1<sup>ère</sup> PARTIE

### Soudabilité des alliages de magnésium

#### 4.1.1 Composition chimique du matériau

Le matériau considéré pour cette application c'est l'alliage de magnésium WE43 qui est un alliage de prédilection pour les applications aéronautique. Il fait partie du groupe des alliages de moulage à bonne mouillabilité [8], dont la composition chimique est la suivante :

Eléments	TR	Nd	Y	Zr	Zn	Mn	Cu	Mg
<b>Requis mini</b>	4.4	2.5	4.3	1.0	<0.2	<0.15	<0.03	90 .19
<b>Requis maxi</b>	2.4	2	3.7	0.1	<0.2	<0.15	<0.03	90.19

Tableau 4.1.1 Composition chimique du WE43.

#### 4.1.2 Données du problème

Les données utilisées pour les calculs sont les suivantes (tableau 4.1.2) :

Nom	Valeur	Unité
Puissance incidente	2000	Watts
Conductivité thermique à l'état solide	167	W/m.K
Conductivité thermique à l'état liquide	130	W/m.K
Chaleur spécifique à l'état solide	1017	J/kg.K
Chaleur spécifique à l'état liquide	1340	J/kg.K
Chaleur spécifique à l'état vapeur	1200	J/kg.K
Masse volumique à l'état solide	1740	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à l'état liquide	1590	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à l'état vapeur	0.4	Kg/m <sup>3</sup>
Chaleur latente de fusion	362000	J/kg
Chaleur latente de vaporisation	5260000	J/kg
Rayon de la tache focale	200	µm

Tableau 4.1.2 Données du problème [6].

#### 4.1.3 Génération de maillage

Les dimensions de la géométrie (figure 4.1.3) sont 2 mm x 1 mm. La zone d'interaction laser-matière est maillée très finement pour prendre en compte les forts gradients présents dans cette zone.

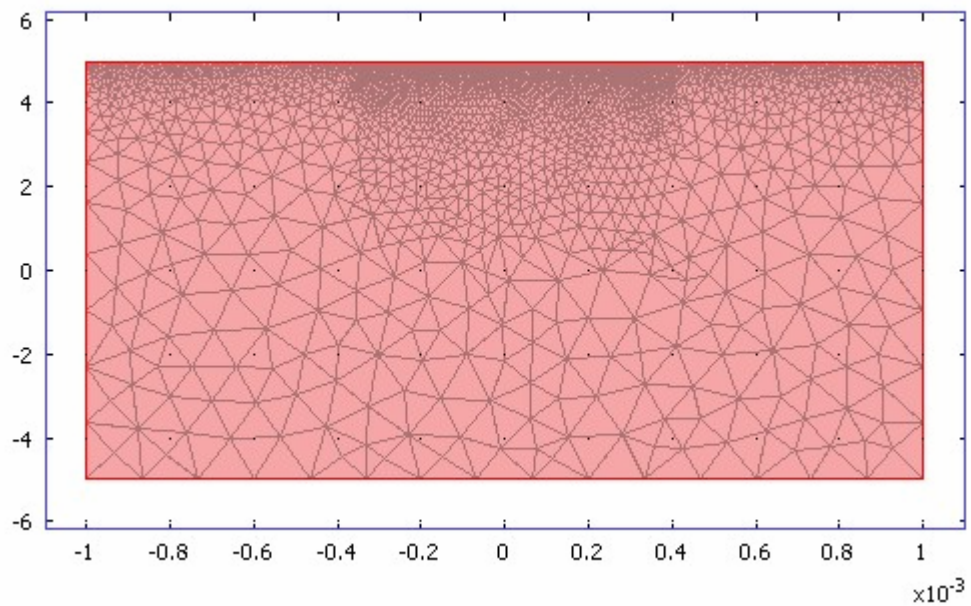


Figure 4.1.3 Géométrie maillée.

La figure 4.1.4 représente le maillage des frontières, on constate clairement que la face d'interaction est maillée très finement par rapport aux autres frontières.

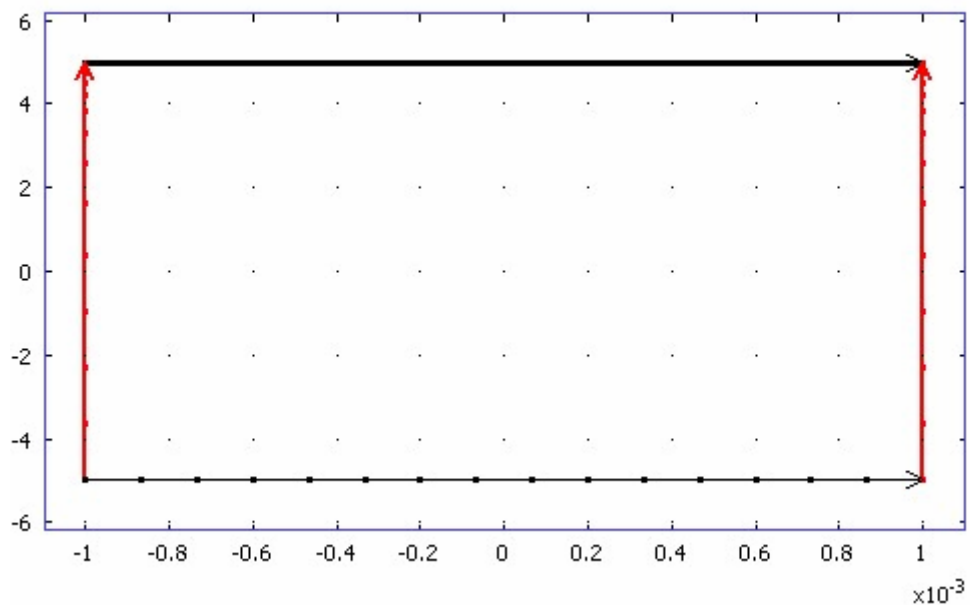


Figure 4.1.4 maillage des frontières.

#### 4.1.4 Formation du keyhole

La figure 4.1.5 représente la géométrie du keyhole, pour une pulse de 5ms, et une absorptivité (eq.9), qui dépend de la température, on remarque que la zone fondue est hémisphérique avec une température maximale au centre de 4332K. La zone fondue est

limitée par l'isotherme 913K qui est la température de fusion de l'alliage WE43 et la vapeur métallique est limitée par l'isotherme 1380K qui est la température de vaporisation de l'alliage WE43.

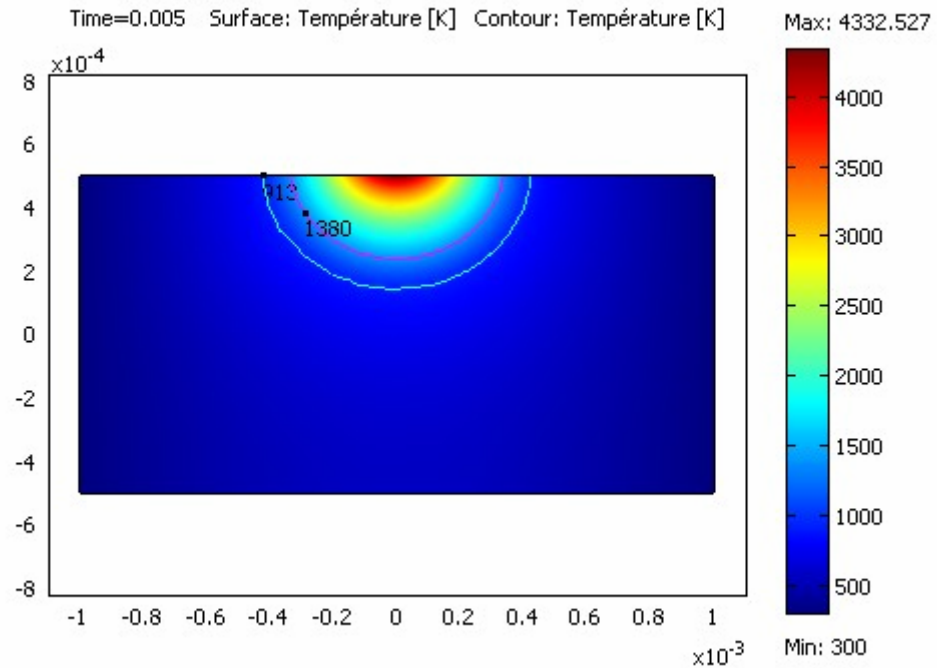


Figure 4.1.5 géométrie de la zone fondue (keyhole), pour une absorptivité en fonction de la température.

#### 4.1.5 Champs thermique

La figure 4.1.6 représente la répartition de la température en profondeur, pour une absorptivité qui dépend de la température on remarque clairement que le gradient de température est plus élevé sur la zone d'interaction. On remarque aussi que le réseau des isothermes est de plus en plus dispersif en allant en profondeur.

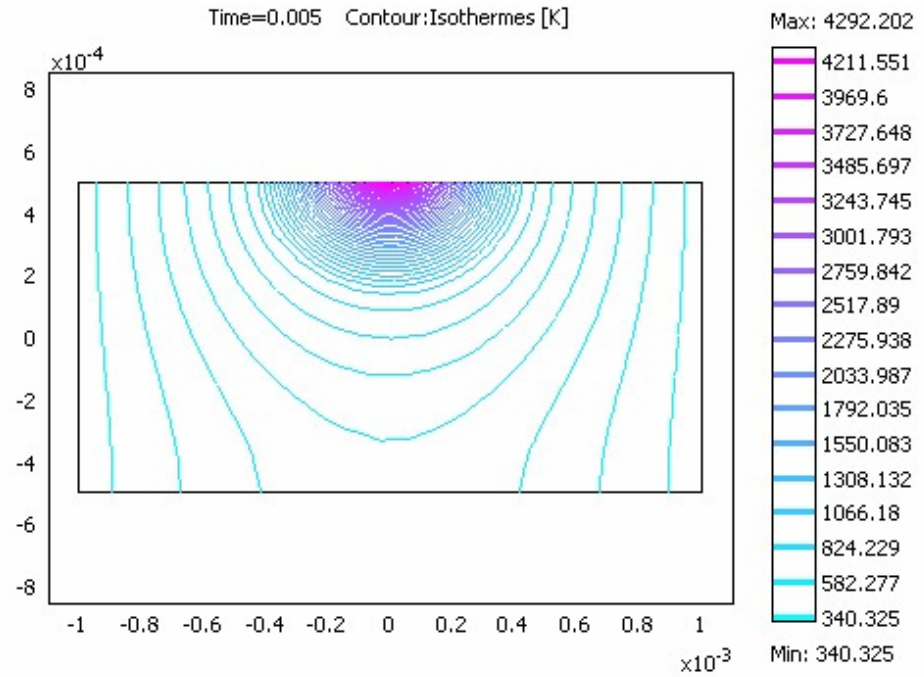


Figure 4.1.6 champs de température, pour une absorptivité qui dépend de la température.

La figure 4.1.7 représente le pic de température qui est de l'ordre de 4332K, pour une absorptivité qui dépend de la température.

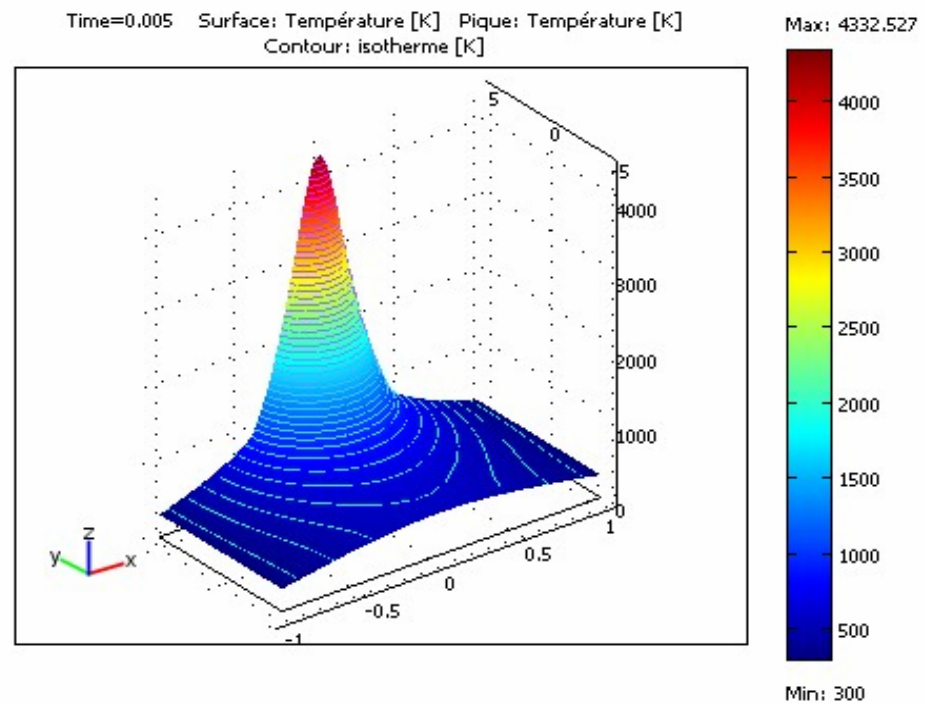


Figure 4.1.7 Pic de température, pour une absorptivité qui dépend de la température.

#### 4.1.6 Flux de chaleur

Les figures 4.1.8 et 4.1.9 représentent respectivement les flux de chaleur par conduction et par rayonnement, qui sont de forme gaussienne. On constate clairement que le transfert de chaleur par conduction est nettement dominant, ce qui fait l'avantage du procédé de soudage par Laser.

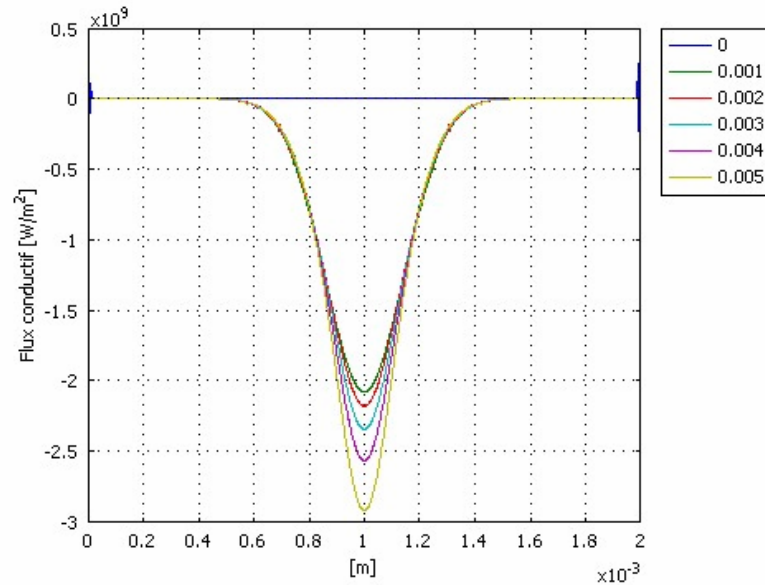


Figure 4.1.8 Flux de chaleur conductif pour une absorptivité en fonction de la température.

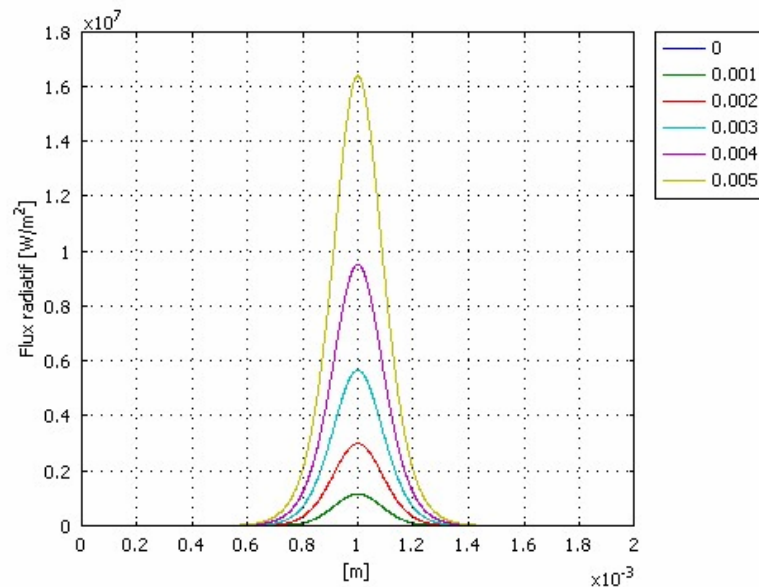


Figure 4.1.9 Flux de chaleur radiatif pour une absorptivité en fonction de la température.

#### 4.1.7 Influence des paramètres du soudage sur la profondeur de pénétration

##### 4.1.7.1 Influence de la vitesse de déplacement

Les graphes de la figure 4.1.10 représentent l'évolution de la profondeur de pénétration en fonction de la vitesse du déplacement (vitesse de soudage), pour différentes valeurs de puissances incidentes, un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs du cordon respectivement (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm).

On constate que la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la vitesse de soudage pour une puissance donnée. On remarque aussi que pour une même puissance incidence et même vitesse mais pour différentes valeurs de largeurs du cordon, la pénétration n'est pas la même, elle est plus importante dans le cas où la largeur est plus petite. Par exemple pour une puissance de 2KW, une vitesse de 2m/min et une largeur du cordon de 1mm, la pénétration est de 3.98mm, alors que pour une même puissance incidente et même vitesse mais une largeur de cordon de 1.5 mm la pénétration est de 3.72mm.

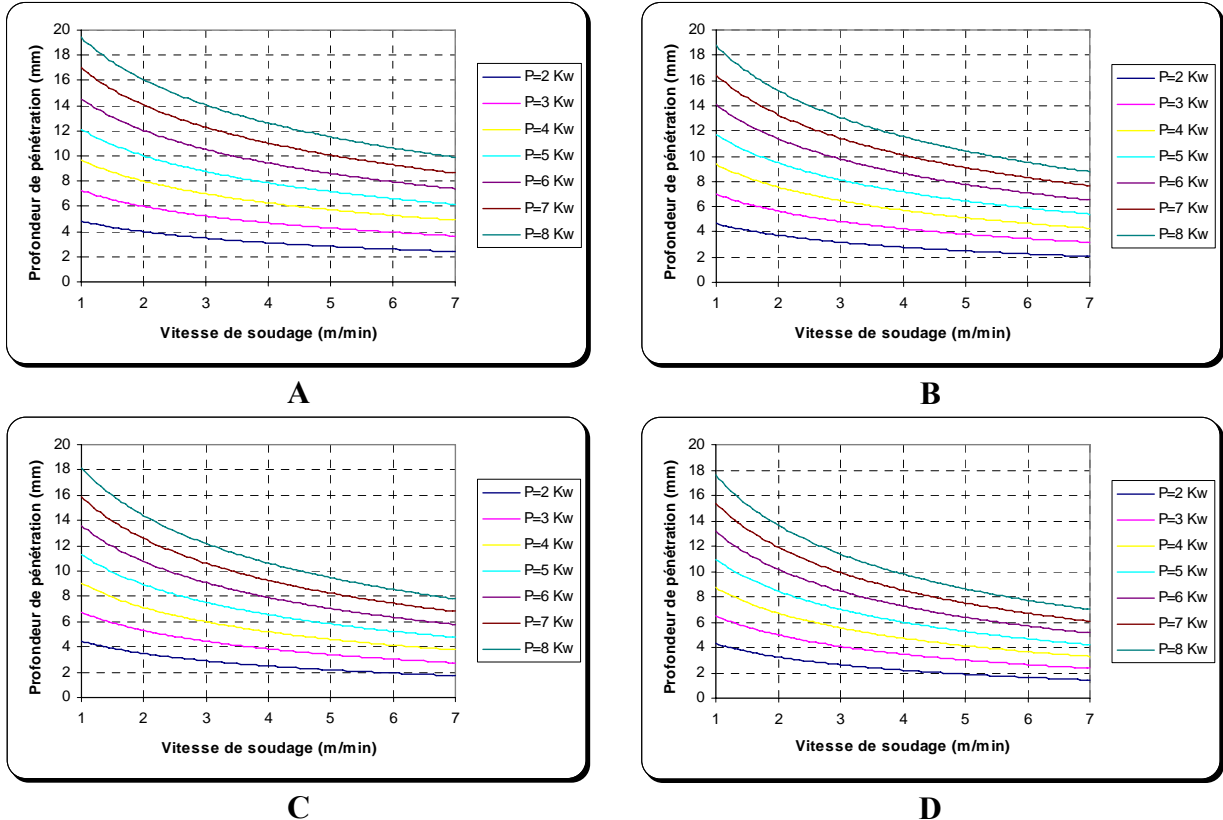


Figure 4.1.10 variations de la profondeur en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

#### 4.1.7.2 Influence de la puissance incidente

Les graphes de la figure 4.1.11 représentent l'influence de la puissance incidente sur la profondeur de pénétration, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement (vitesse de soudage), un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs du cordon respectivement (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm).

On constate que l'évolution de la profondeur de pénétration est proportionnelle à la puissance incidente pour une vitesse de déplacement donnée. Comme on l'a constaté dans (§ 4.1.7.1) la profondeur de pénétration pour une même vitesse et même puissance incidente mais pour différentes valeurs de largeur du cordon, n'est pas la même. Par exemple pour une puissance de 3Kw, une vitesse de 3m/min et une largeur de 1.5mm, la pénétration est de 3.84mm, alors que pour une même puissance incidente, une même vitesse et une largeur de 2mm, la pénétration est de 3.34mm.

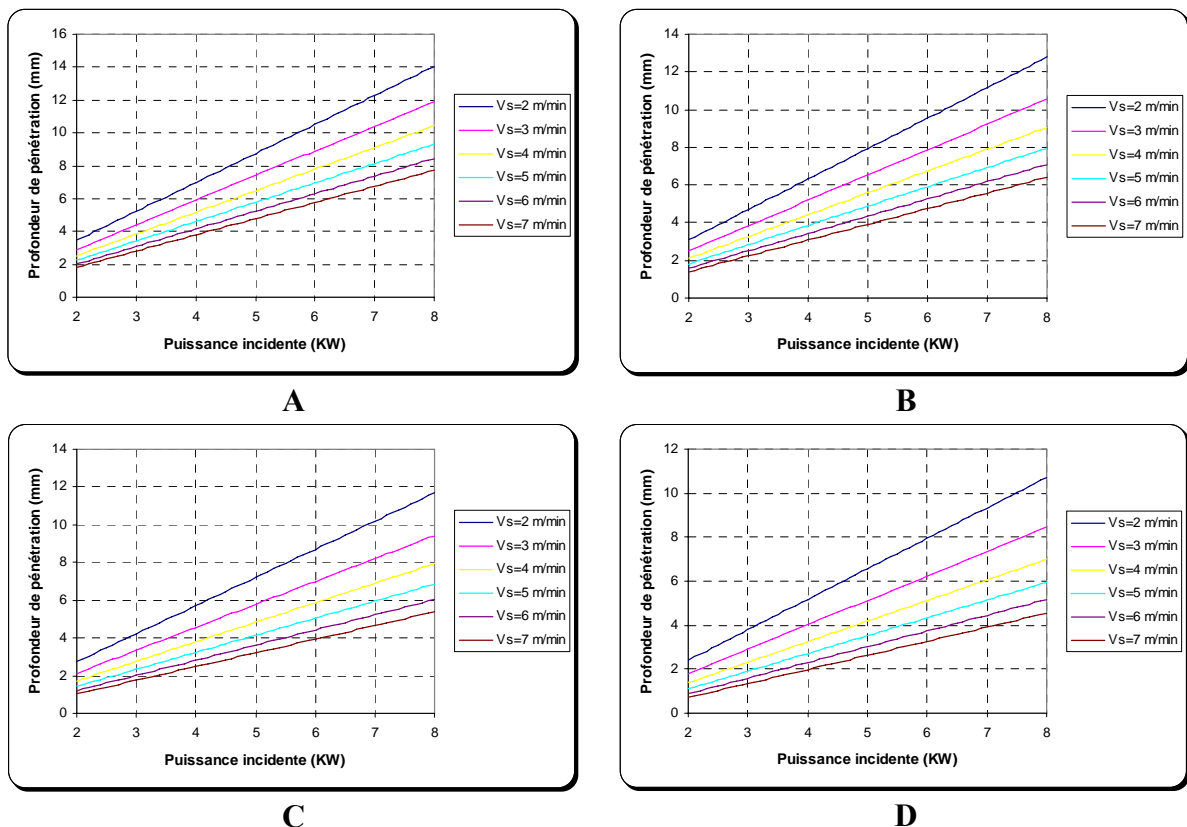


Figure 4.1.11 variations de la profondeur en fonction de la puissance incidente, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.



#### 4.1.7.3 Influence de l'énergie linéique

Les graphes de la figure 4.1.12 représentent l'évolution de la profondeur de pénétration en fonction de l'énergie linéiques, pour différentes valeurs de puissance incidente, un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs de cordon (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm).

On constate que la profondeur de pénétration augmente en augmentant l'énergie linéique. Donc, on peut à partir de ces courbes choisir la puissance incidente et la vitesse de déplacement nécessaire pour avoir la pénétration voulue. Par exemple pour une largeur de cordon de 1.5mm, et si on veut atteindre une pénétration de 5mm, on peut à partir du graphe (figure 4.1.12-B) tirer l'énergie linéique nécessaire qui est le rapport (puissance incidente/vitesse de soudage), avec une source laser qui peut fournir une puissance de 3kw, on voit que l'énergie linéique avec laquelle on peut atteindre les 5mm voulue, elle est de l'ordre de 0.87KJ/cm, donc, la vitesse nécessaire est de 275cm/min.

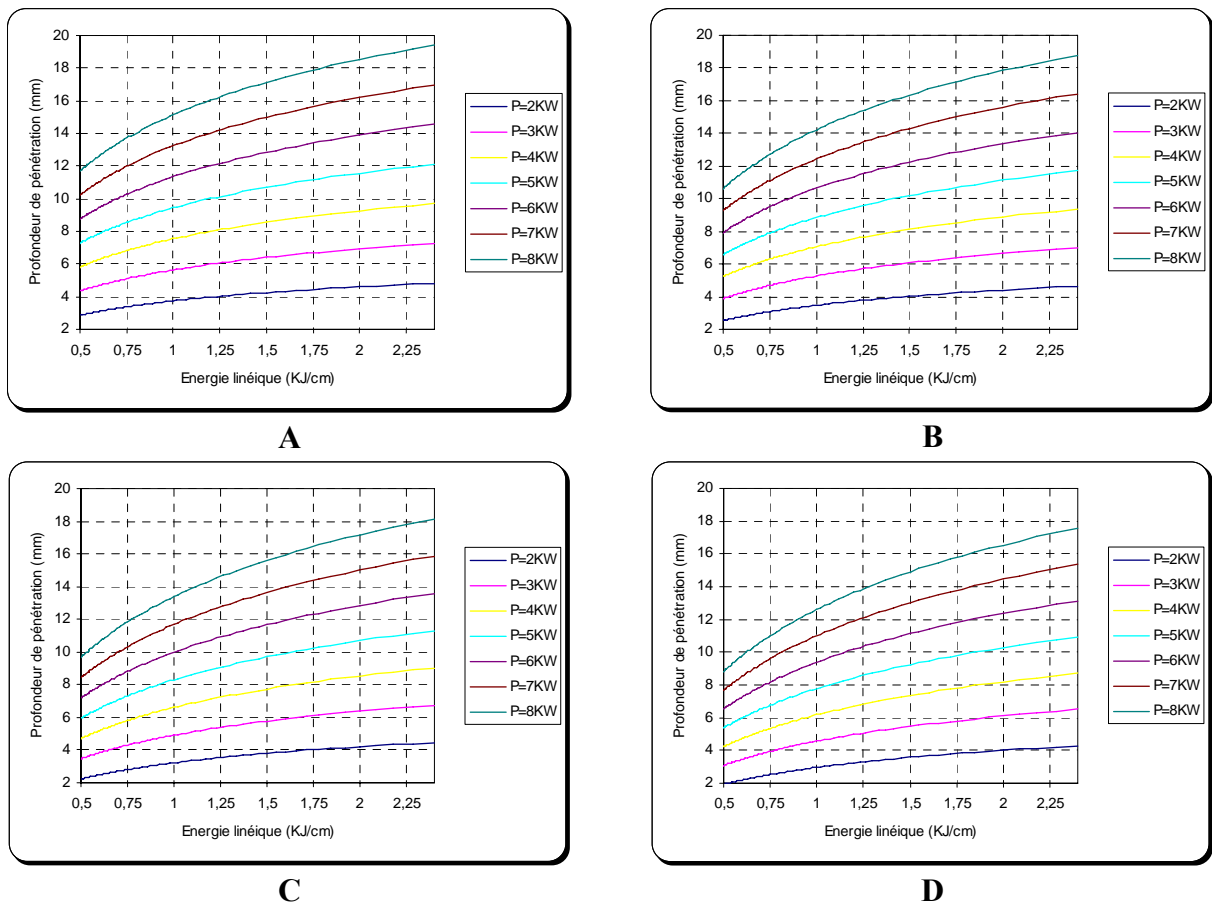


Figure 4.1.12 variations de la profondeur en fonction de l'énergie linéique, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

La figure 4.1.13 représente une comparaison entre les résultats expérimentaux et théorique pour une largeur de cordon de 2.5 mm.

Les résultats expérimentaux sont les suivants [7] :

Puissance (KW)	Vitesse de soudage (m/min)	Profondeur de pénétration (mm)
2	2	4
2	3	2.1
2	4	2.1
2	6	2
3	2	4.75

A partir du graphe ci-dessous, on remarque un accord relativement satisfaisant entre les deux résultats (théoriques et expérimentaux).

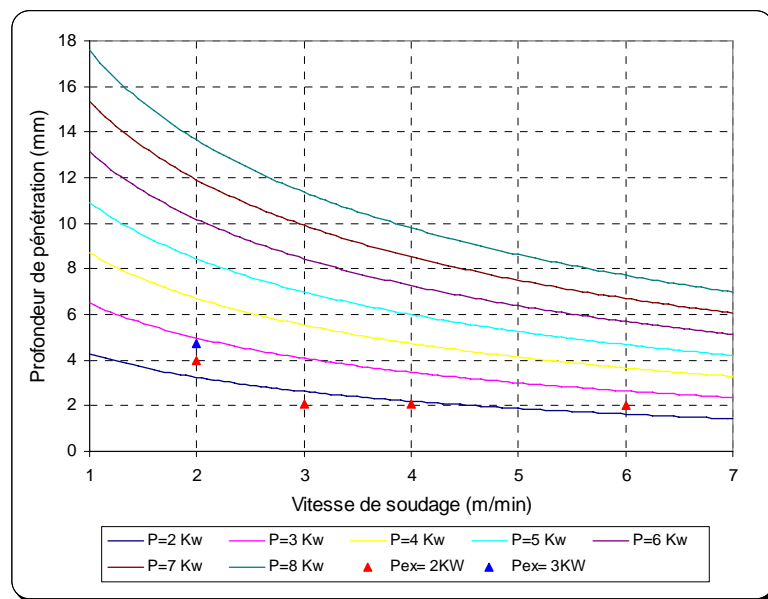


Fig.4.1.13 comparaison entre les résultats expérimentaux et théorique pour une largeur de cordon de 2.5 mm.

#### 4.1.8 Influence de la vitesse de déplacement sur la largeur du cordon

Les graphes de la figure 4.1.14 représentent l'évolution de la largeur de cordon en fonction de la vitesse, pour un diamètre de faisceau laser de 0.35mm, pour différentes valeurs de profondeur de pénétration et pour différentes valeurs de puissances incidente, respectivement (A, B, C : 2.5kw, 3kw, 4kw).

On constate que l'évolution de la largeur du cordon pour une puissance donnée est inversement proportionnelle à la vitesse de soudage, jusqu'à une valeur où ce dernier devient impossible. Par exemple pour une puissance de 4kw (figure 4.1.14-C), pour une profondeur de 4,5mm et une vitesse de 250cm/min la largeur est de 1.74mm, et au-delà de 550cm/min la largeur tant vers zéro. Ceci dit, qu'au-delà de certaine vitesse de déplacement le soudage est impossible.

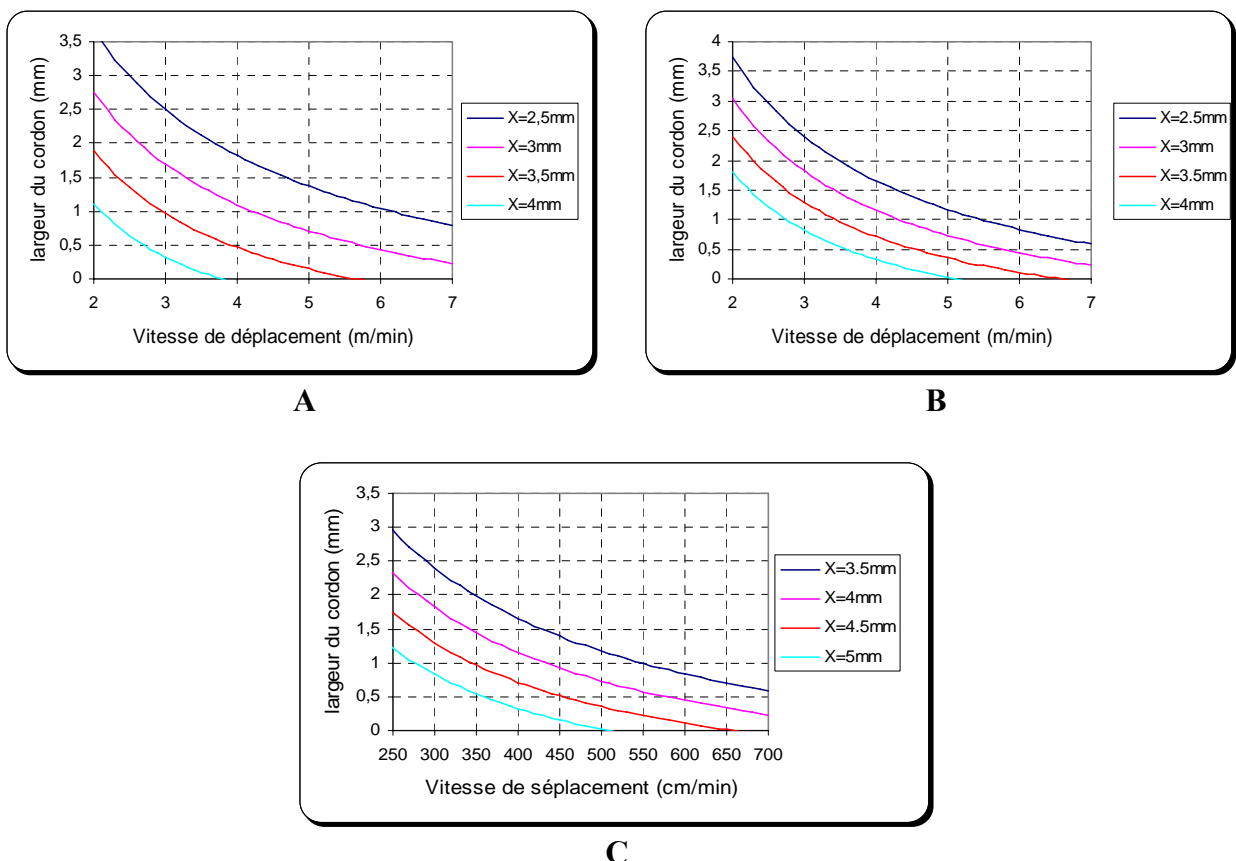


Figure 4.1.14 variations de la largeur du cordon en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

## 2<sup>ème</sup> PARTIE

### Soudabilité des alliages d'aluminium

#### 4.2.1 Composition chimique du matériau

L'alliage considéré pour cette application est l'alliage d'aluminium AU4G /2017A, qui est un alliage d'aluminium cuivre (série 2000), à 4% de cuivre, encore souvent appelé de nos jours « Dural ». C'est un alliage à durcissement structural qui possède une bonne résistance mécanique, grâce à la formation de composés intermétalliques  $Al_2Cu$  obtenus après traitement thermique de trempe [11].

Les principaux domaines d'utilisation concernent l'aéronautique, l'armement, chemins de fer, l'industrie automobile et la construction mécanique. Sa composition chimique est la suivante :

Elément	Cu	Mg	Mn	Al
<b>Composition (masse%)</b>	4.5	1.5	0.6	93.4

Tableau 4.2.1 Composition chimique du AU4G /2017A [11].

#### 4.2.2 Données du problème

Les données utilisées pour le calcul sont les suivantes (tableau 4.2) :

Nom	Valeur	Unité
Puissance incidente	2000	Watts
Chaleur spécifique à l'état vapeur	1200	J/kg.K
Masse volumique à l'état solide	2770	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à l'état liquide	2380	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à l'état vapeur	0.4	Kg/m <sup>3</sup>
Chaleur latente de fusion	388000	J/kg
Chaleur latente de vaporisation	10815000	J/kg
Rayon de la tache focale	200	µm

Tableau 4.2.2 Données du problème [11].

La conductivité thermique : pour  $273K \leq T \leq 911K$  est donnée par [11] :

$$K_{th} = 143.86 - 0.4663T + 1.761710^{-3}T^2 - 1.445710^{-6}T^3 \quad (W/mK) \quad (29)$$

La conductivité thermique pour  $911K < T$  est donnée par [11] :

$$K_{th} = 56.39 + 3.398810^{-2}T \quad (W/m.K) \quad (30)$$

La capacité calorifique pour  $273K \leq T \leq 911K$  est donnée par [11] :

$$Cp = 1000.2 - 1.199T + 3.097510^{-3}T^2 - 1615110^{-6}T^3 \quad (J/Kg.K) \quad (31)$$

La capacité calorifique pour  $911K < T$  est constante [15] :  $Cp=1254(J/Kg.K)$

#### 4.2.3 Génération de maillage

Comme dans le 1<sup>er</sup> cas (§4.1.3), les dimensions de la géométrie (figure 4.2.3) sont 2 mm x 1 mm. La zone d'interaction laser-matière est maillée très finement pour prendre en compte les forts gradients de température présents dans cette zone. La taille maximale des éléments sur la face d'interaction est de  $10^{-5}$ mm.

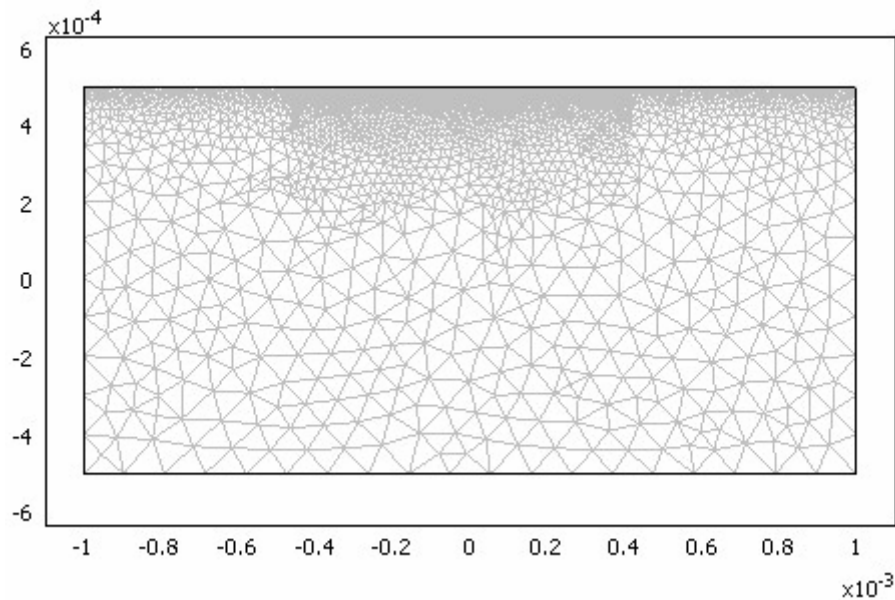


Figure 4.2.3 Géométrie maillée

#### 4.2.4 Formation du Keyhole

La géométrie du keyhole, pour une pulse de 5ms, et une absorptivité (eq.9) qui dépend de la température (figure 4.2.4), est de forme hémisphérique avec une température maximale au centre de 3124 K. La zone fondue est limitée par l'isotherme 911 K, et la vapeur métallique est limitée par l'isotherme 2740K, qui sont respectivement la température de fusion et de vaporisation de l'alliage AU4G/2017A.

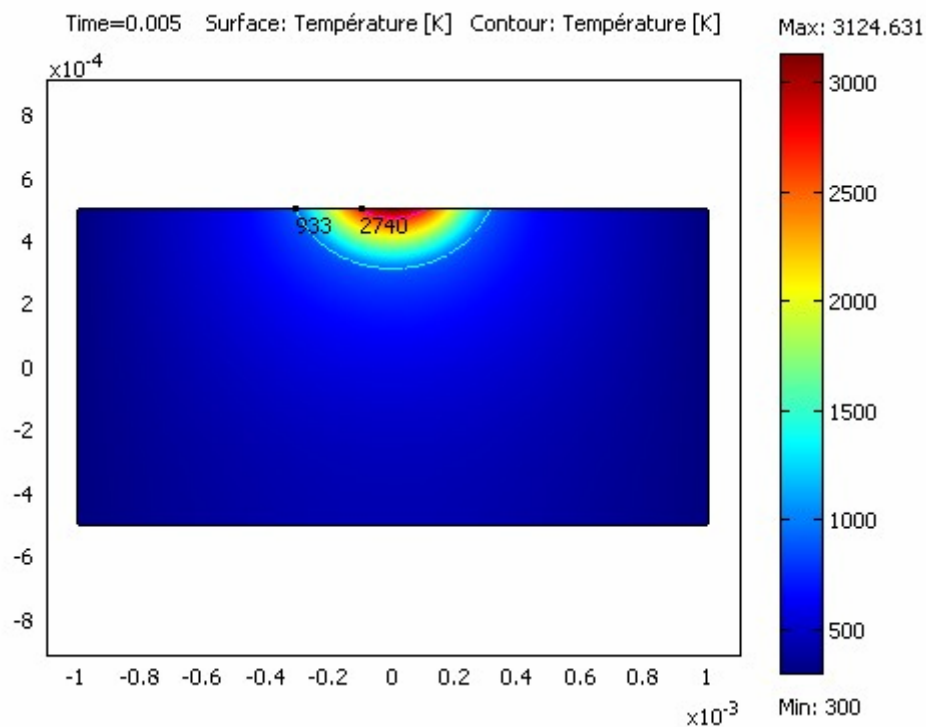


Figure 4.2.4 géométrie de la zone fondue (keyhole), pour une absorptivité en fonction de la température temps=5ms.

#### 4.2.5 Champs thermique

Le réseau des isothermes lorsque l'absorptivité est une fonction de température (figure 4.2.5), est de plus en plus dispersif dans le sens de la profondeur.

On constate que le gradient de température est plus élevé dans la zone d'interaction faisceau matière.

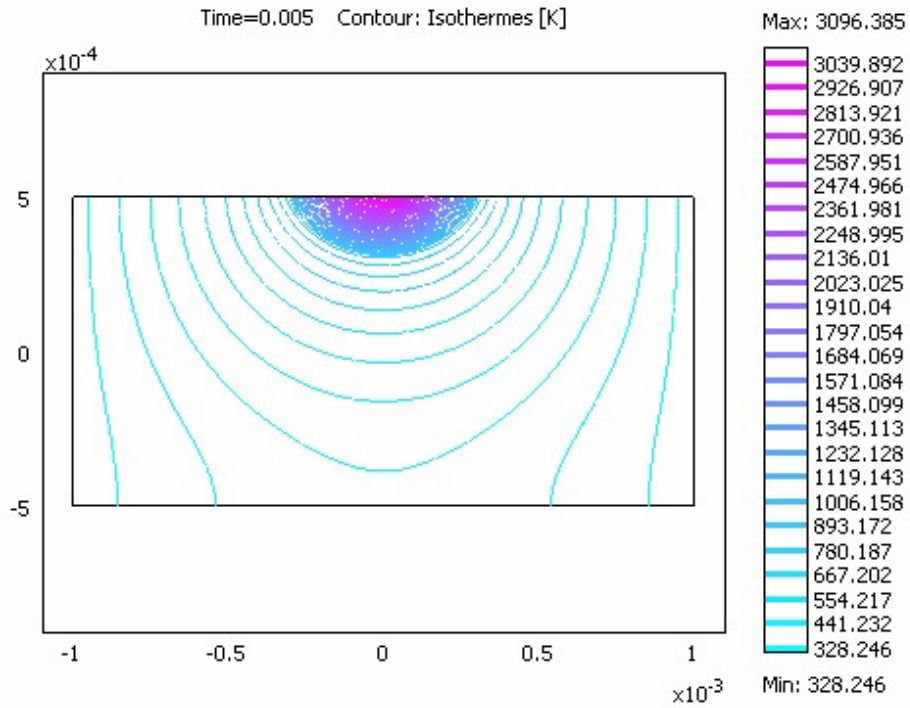


Figure 4.2.5 champs de température, pour une absorptivité qui dépend de la température.

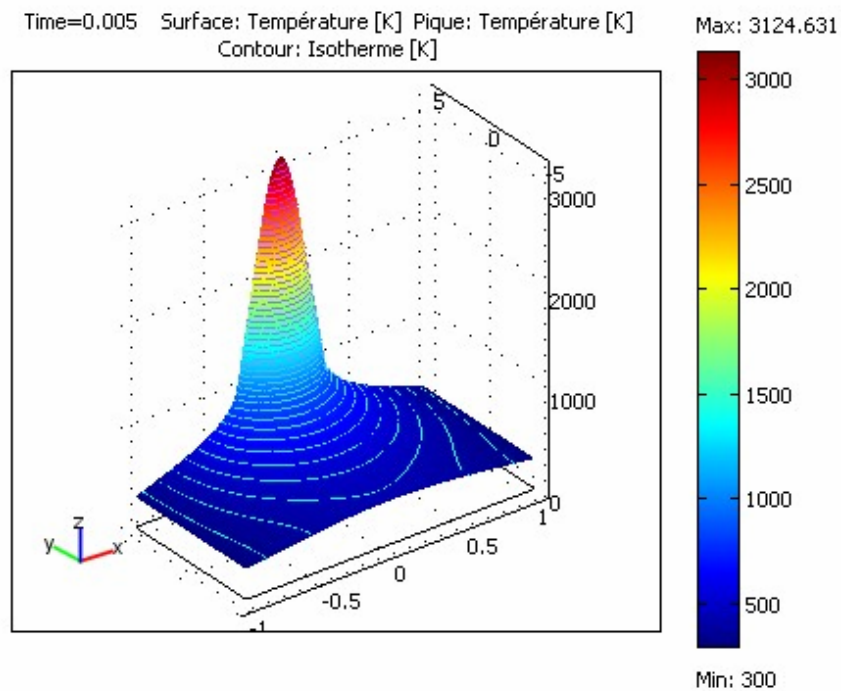


Figure 4.2.6 Pic de température, pour une absorptivité en fonction de la température.

#### 4.2.6 Flux de chaleurs

Les flux de chaleur par conduction et par rayonnement sont représentés respectivement sur les figures 4.2.7 et 4.2.8, ils sont de forme gaussienne. Comme dans le cas d'alliage de magnésium on constate clairement que le transfert de chaleur par conduction est nettement dominant.

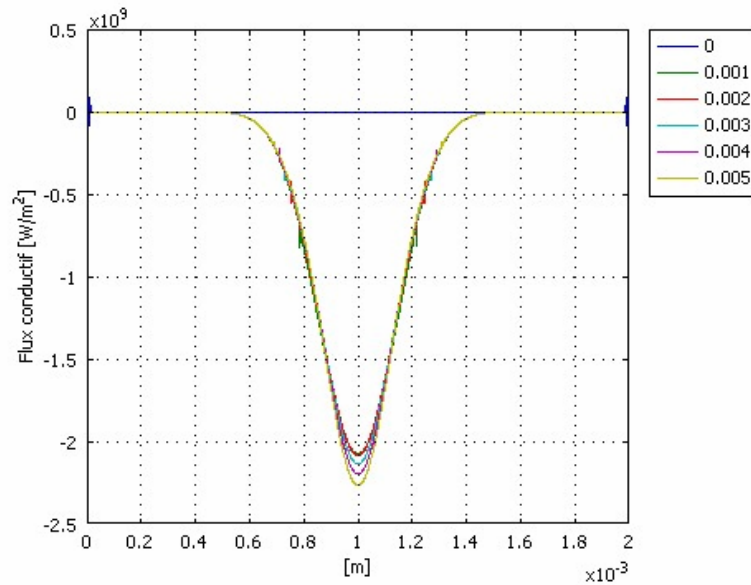


Figure 4.2.7 Flux de chaleur conductif pour une absorptivité en fonction de la température.

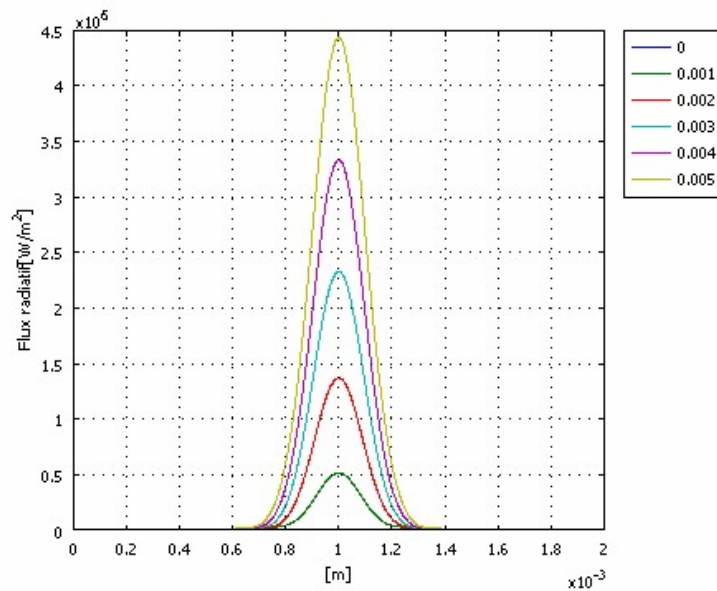


Figure 4.2.8 Flux de chaleur radiatif pour une absorptivité en fonction de la température.



#### 4.2.7 Influence des paramètres du soudage sur la profondeur de pénétration :

##### 4.2.7.1 Influence de la vitesse de déplacement

Les graphes de la figure 4.2.9 représentent l'évolution de la profondeur de pénétration en fonction de la vitesse du déplacement (vitesse de soudage), pour différentes valeurs de puissances incidentes, un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs du cordon respectivement (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm).

Comme pour le cas de l'alliage WE43 (§.4.1.7), on constate que la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la vitesse de soudage pour une puissance donnée. On remarque aussi que pour une même puissance incidence et même vitesse mais pour différentes valeurs de largeurs du cordon, la pénétration n'est pas la même, elle est plus importante dans le cas où la largeur est plus petite, ce qui confirme le procédé de soudage par keyhole. Par exemple pour une puissance de 4KW, une vitesse de 2m/min et une largeur du cordon de 1mm, la pénétration est de 3.15mm, alors que pour une même puissance incidente et même vitesse mais pour une largeur de cordon de 1.5 mm la pénétration est de 2.87mm.

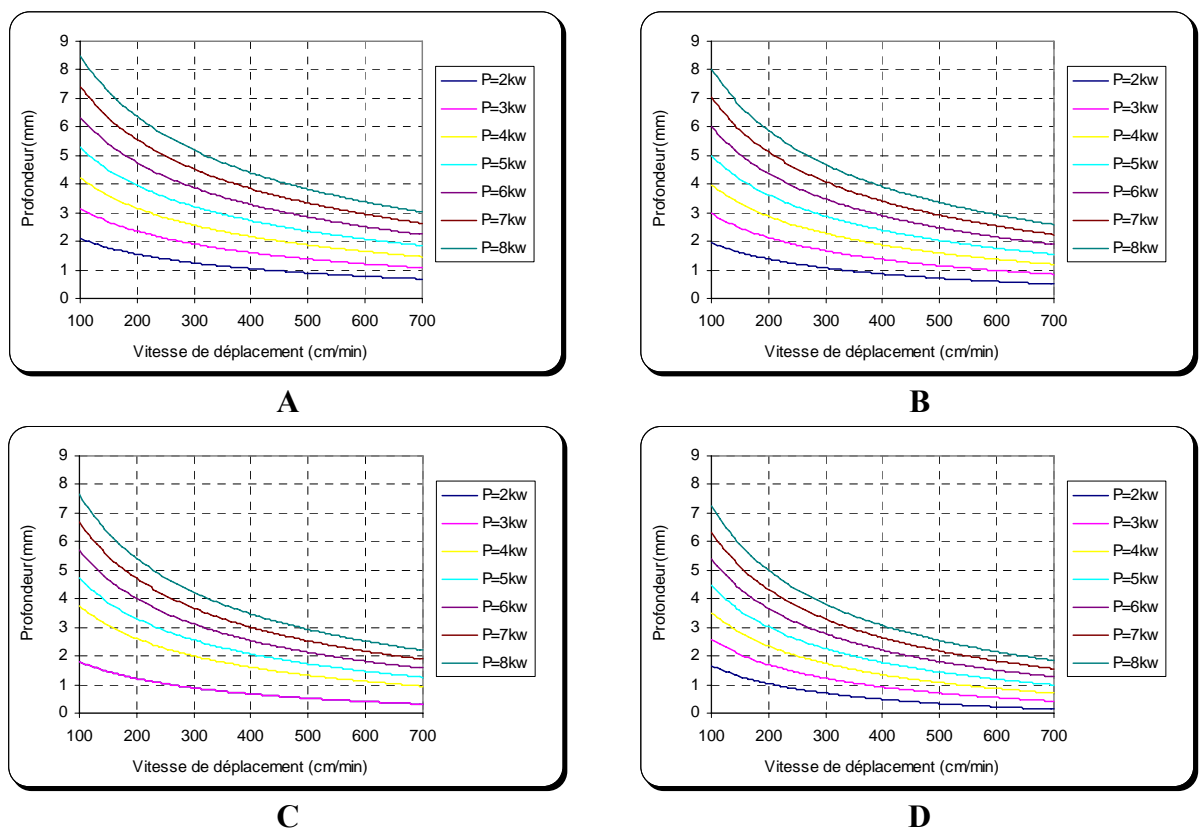


Figure 4.2.9 variations de la profondeur en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

#### 4.2.7.2 Influence de la puissance incidente

L'étude de l'influence de la puissance incidente sur la profondeur de pénétration, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement (vitesse de soudage), pour un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs du cordon respectivement (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm), est représentée sur la figure 4.2.10.

On constate que l'évolution de la profondeur de pénétration est proportionnelle à la puissance incidente pour une vitesse de déplacement donnée. Comme on l'a constaté dans le cas de l'alliage WE43 (§ 4.1.7.2) la profondeur de pénétration pour une même vitesse et même puissance incidente mais pour différentes valeurs de largeur du cordon, n'est pas la même. Par exemple pour une puissance de 3Kw, une vitesse de 2m/min et une largeur de 1mm, la pénétration est de 2.19mm, alors que pour une même puissance incidente, une même vitesse et une largeur de 2mm, la pénétration est de 1.65mm.

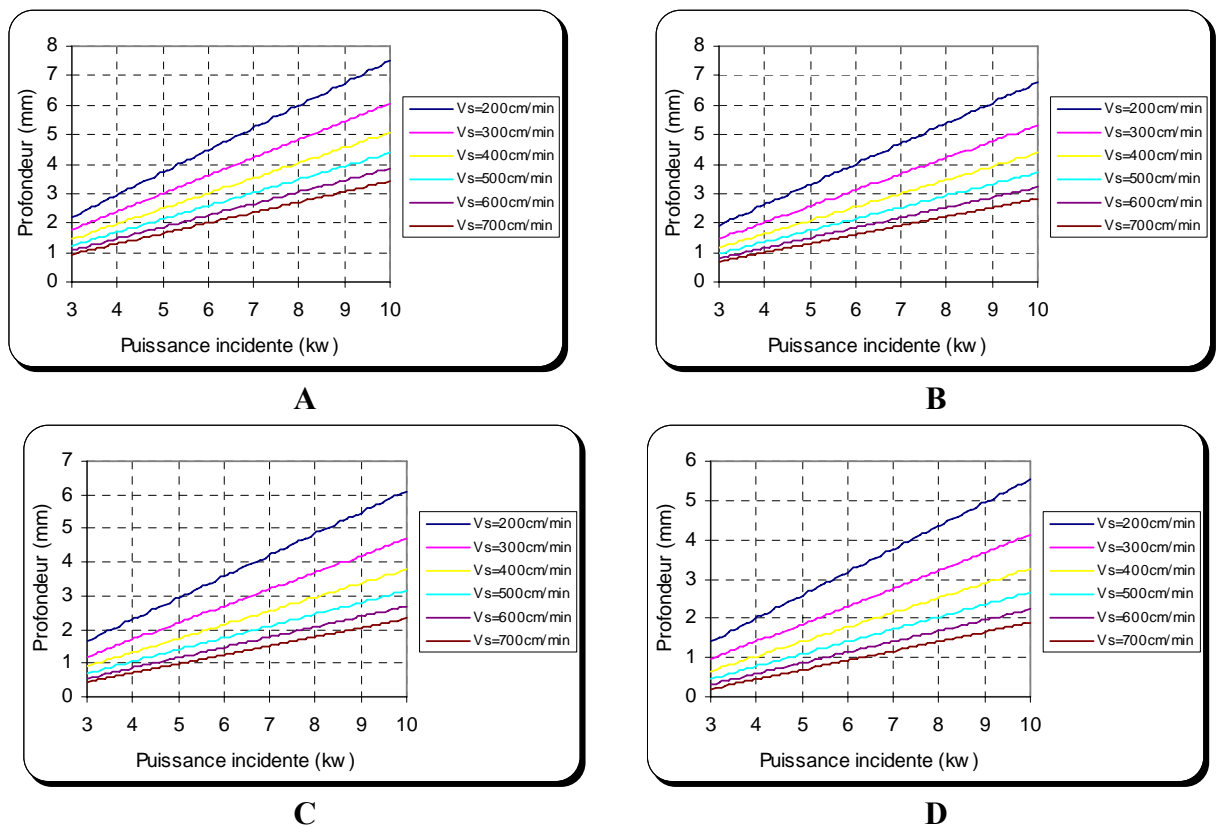


Figure 4.2.10 variations de la profondeur en fonction de la puissance incidente, pour différentes valeurs de vitesse de déplacement, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

### 4.2.7.3 Influence de l'énergie linéique

Les graphes de la figure 4.2.11 représentent l'évolution de la profondeur de pénétration en fonction de l'énergie linéique, pour différentes valeurs de puissance incidente, un diamètre de faisceau de 0.35mm et pour différentes valeurs de largeurs de cordon (A, B, C, D ; 1mm, 1.5mm, 2mm et 2.5mm).

On constate que la profondeur de pénétration augmente en augmentant l'énergie linéique. Donc, on peut à partir de ces courbes choisir la puissance incidente et la vitesse de déplacement nécessaire pour avoir la pénétration voulue. Par exemple pour une largeur de cordon de 1mm, et si on veut atteindre une pénétration de 4mm, on peut à partir du graphe (figure 4.2.11-A) tirer l'énergie linéique nécessaire qui est le rapport (puissance incidente/vitesse de soudage), avec une source laser qui peut fournir une puissance de 4kw, on voit que l'énergie linéique avec laquelle on peut atteindre la pénétration voulue (4mm), elle est de l'ordre de 0.61KJ/cm, donc, la vitesse nécessaire est de l'ordre de 394cm/min.

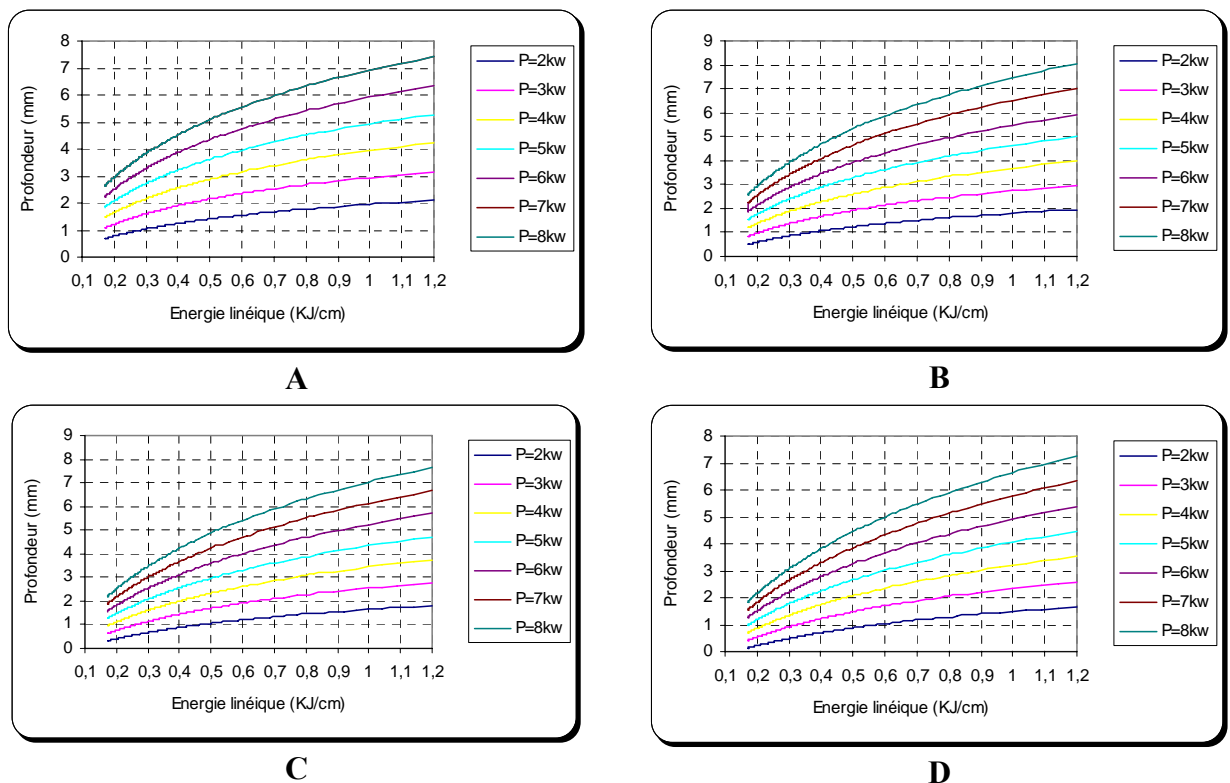


Figure 4.2.11 variations de la profondeur en fonction de l'énergie linéique, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

#### 4.2.8 Influence de la vitesse de déplacement sur la largeur du cordon

Les graphes de la figure 4.2.12 représentent l'évolution de la largeur de cordon en fonction de la vitesse, pour un diamètre de faisceau laser de 0.35mm, pour différentes valeurs de profondeur de pénétration et pour différentes valeurs de puissances incidente, respectivement (A, B, C : 3kw, 4kw, 5kw).

On constate que l'évolution de la largeur du cordon pour une puissance donnée est inversement proportionnelle à la vitesse du soudage, jusqu'à ce dernier devient impossible. Par exemple pour une puissance de 4kw (figure 4.2.12-B), pour une profondeur de 3mm et une vitesse de 2m/min la largeur est de 0.8mm, et au-delà de 310cm/min la largeur tant vers zéro. Ceci dit, qu'au-delà de certaine vitesse de déplacement le soudage est impossible.

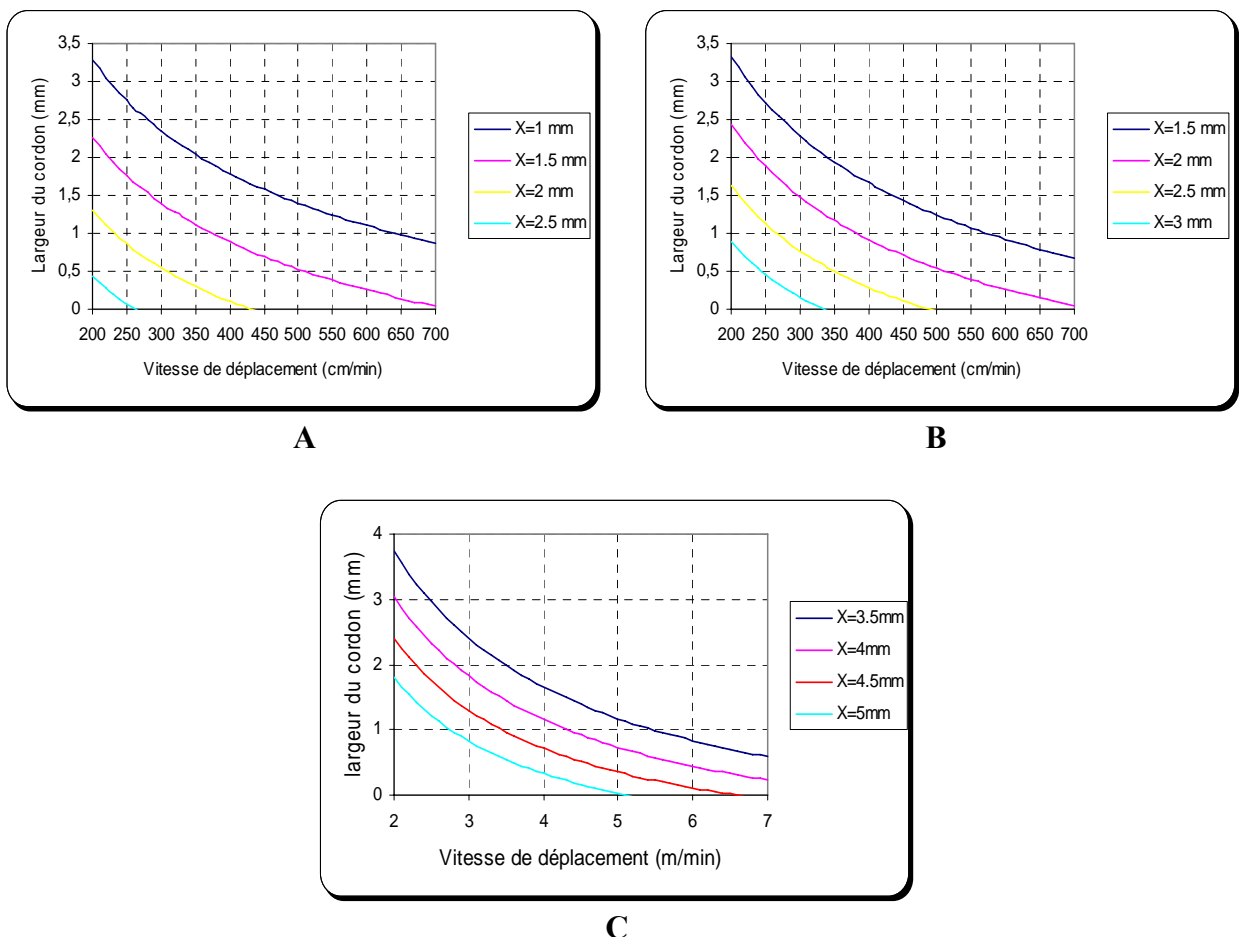


Figure 4.2.12 variations de la largeur du cordon en fonction de la vitesse de déplacement, pour différentes valeurs de puissance incidente, et un diamètre du faisceau de 0.35mm.

#### 4.3 Conclusion

D'après les résultats obtenus pour les deux applications précédentes (§4.1 et §4.2), on peut dire que les dimensions du joint de soudure, c'est-à-dire, la profondeur de pénétration et la largeur du cordon sont liées directement aux paramètres du procédé (vitesse de soudage, puissance incidente), ainsi qu'aux propriétés thermo physiques du matériau à assembler.

A l'aide du modèle proposé on peut trouver un compromis entre la puissance incidente et la vitesse de déplacement, selon l'épaisseur, les propriétés thermo physiques du matériau et l'équipement disponible.

Dans ce qui suit, on va comparer la soudabilité des deux alliages considérés, le WE43 et le AU4G /2017A.

#### 4.4 Comparaison du soudabilité de l'alliage WE43 et l'alliage AU AU4G /2017A

La figure 4.4.1 représente la variation de la profondeur de pénétration en fonction de la vitesse de déplacement, pour les deux alliages considérés le WE43 et le AU4G/2017A. On constate que pour une même puissance et même vitesse de déplacement la profondeur de pénétration n'est pas la même, par exemple pour une puissance incidente de 5kw et une vitesse de 200cm/min la pénétration pour l'alliage de magnésium (WE43) est de 10 mm et pour l'alliage d'aluminium (AU4G/2017A) elle est de 4 mm.

De même pour la variation de la profondeur de pénétration en fonction de la puissance incidente pour les deux alliages considérés (figure 4.4.2), on remarque clairement l'écart entre la profondeur pour une vitesses données. Par exemple pour une puissance de 3,5kw et une vitesse de 400cm/min la profondeur de pénétration pour le WE43 est de 4.66mm, alors que pour le AU4G/2017A elle de 1.70 mm.

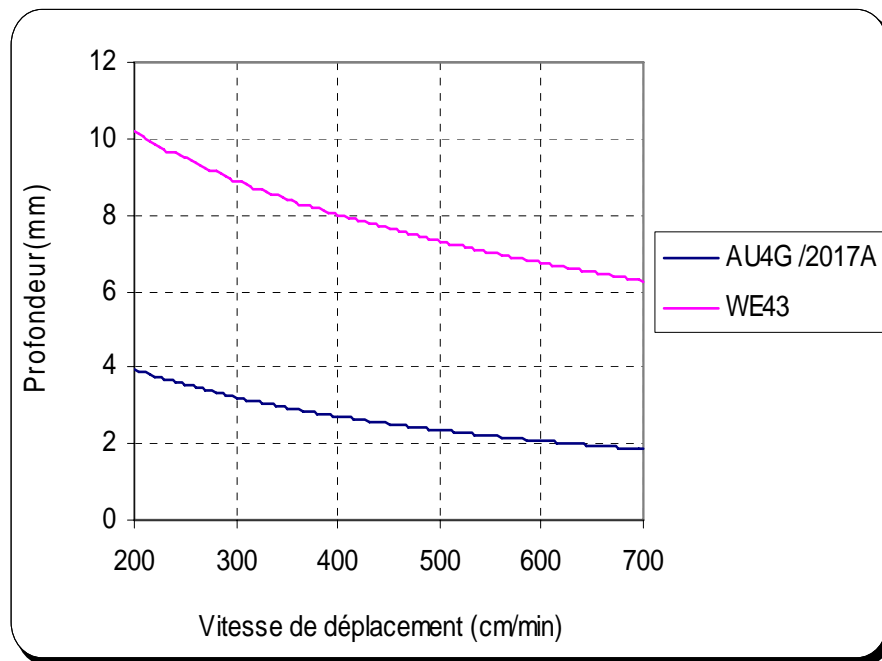


Figure 4.4.1 variation de la profondeur de pénétration en fonction de la vitesse de déplacement pour une puissance incidente de 5kw, une largeur du cordon de 1mm et un diamètre de faisceau de 0.35mm.

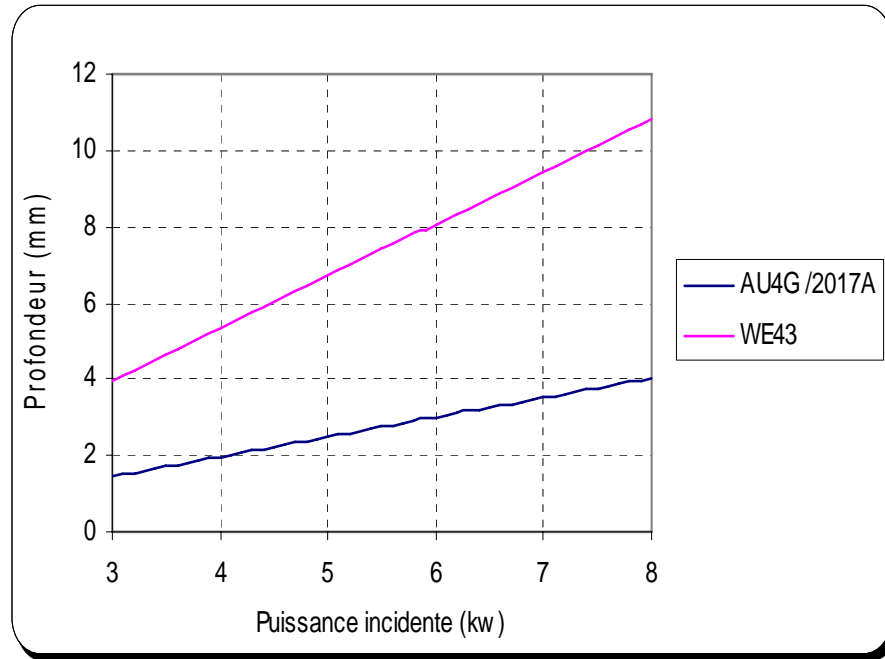


Figure 4.4.2 variation de la profondeur de pénétration en fonction de la puissance incidente pour une vitesse de déplacement de 400cm/min, une largeur du cordon de 1mm et un diamètre de faisceau de 0.35mm.

Cet écart entre la valeur de la profondeur de pénétration pour les deux alliages considérés peut être expliqué par la différence des propriétés thermo physique (conductivité, masse volumique, chaleur massique) des deux alliages.

En fin, on peut dire que la soudabilité de l'alliage de magnésium WE43 par faisceau laser CO<sub>2</sub> est nettement meilleure que celle de l'alliage d'aluminium AU4G/2017A.

## CONCLUSION

L'objectif de ce présent travail était la modélisation du procédé de soudage par faisceau laser CO<sub>2</sub>, et de déterminer l'effet de la puissance incidente et la vitesse du soudage sur les dimensions du cordon de soudure. On a pris dans notre modélisation une distribution gaussienne du flux laser, avec un modèle de bain de fusion hémisphérique et avec des propriétés physique dépendantes de la température.

En matière procédé, On a pu constater après notre étude bibliographique que, le soudage par faisceau laser CO<sub>2</sub> réalise des assemblages de qualité par rapport aux autres procédés conventionnels, grâce à un transfert de chaleur qui se fait au cœur de la matière, et à une très bonne protection gazeuse de la zone fondue et du faisceau laser. Ceci en fait un procédé de prédilection pour les industries aéronautiques, aérospatial, automobiles ou nucléaires.

Mais cette excellence se fait au détriment du coût de l'investissement qui est nettement plus élevé que les autres procédés de soudage.

Suite à un grand effort en collaboration avec mon encadreur, le modèle qu'on a proposé peut être exploité industriellement, on peut connaître la puissance incidente et la vitesse adéquates pour réaliser une soudure laser en fonction des propriétés physiques et l'épaisseur du matériau, le modèle nous a données des résultats avec un bon accord en comparant à celles obtenues par l'expérience [validation].

En matière résultats, on peut conclure que les températures atteignent leur pique dans la zone d'impact faisceau-matière, plus précisément dans le point situé au centre de la source. Au fur et a mesure qu'on s'éloigne de la zone d'impact dans le sens de la profondeur la température diminue et le champs thermique (isothermes) deviennent plus dispersif.



A partir des résultats obtenus, il ressort qu'il est nécessaire de connaître précisément le diamètre du capillaire, de la formation et de l'évolution de plasma en cours de soudage, la position du point de focalisation et également les propriétés physiques du métal qui jouent un rôle prépondérant.

En fin, on peut dire que ce travail était très bénéfique, il nous a permis de comprendre et modéliser un phénomène physique en tenant compte des hypothèses simplificatrices, et de déterminer l'influence de chaque paramètre du procédé considéré.

En perspective, on propose de prendre en compte le mouvement convectif à l'intérieur de la zone fondue. La modélisation de l'écoulement dans le bain liquide sera basée sur la résolution des équations de Navier Stokes. La convection forcée sera introduite par l'implémentation des conditions en surface et les forces de volume par une approximation de Boussinesq. L'écoulement dans la zone pâteuse sera modélisé par addition d'un terme dans l'équation de la conservation du mouvement.

## APPENDICE A

## LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

$\theta$	: Angle d'incidence du faisceau laser par rapport à la surface.
$\sigma$	: Émissivité.
$\omega_p$	: Fréquence du plasma de matériau.
$\Gamma$	: Fréquence de collision des électrons.
$\varepsilon$	: Constante de Stefan Boltzmann.
$\varepsilon_0$	: Constante diélectrique.
$\varepsilon_1$	: Partie réelle permittivité électrique.
$\varepsilon_2$	: Partie imaginaire électrique.
$\rho_s$	: Masse volumique à l'état solide.
$\rho_g$	: Masse volumique à l'état gaz.
$\rho_l$	: Masse volumique à l'état liquide.
$\lambda_L$	: Longueur d'onde du laser.
$A_{par}$	: Absorptivité pour une polarisation parallèle.
$A_{per}$	: Absorptivité pour une polarisation perpendiculaire.
$a_s$	: Diffusivité thermique.
$C_{p_l}$	: Chaleur spécifique à l'état liquide.
$C_{p_g}$	: Chaleur spécifique à l'état gaz.
$C_{p_s}$	: Chaleur spécifique à l'état solide.
$D$	: Diamètre du faisceau laser sur l'optique de focalisation
$d$	: Diamètre du faisceau laser.
$F$	: Focale de l'optique de focalisation.
$H_f$	: Enthalpie de fusion.
$h_g$	: Coefficient d'échange convectif.
$H_v$	: Enthalpie de vaporisation.
$I_0$	: Flux laser surfacique.
$k$	: Indice d'absorption.
$K_0$	: Fonction de Bessel.
$K_B$	: Constante de Stefan Boltzmann.
$K_l$	: Conductivité thermique à l'état liquide.
$K_s$	: Conductivité thermique à l'état solide.
$L$	: Nombre de Lorentz.
$M$	: Nombre de mode de faisceau laser
$m^*$	: Masse effectif d'électron.
$n$	: Indice de réfraction.
$n_e$	: Densité d'électron.
$P_g$	: Puissance transmise au capillaire.
$P_l$	: Puissance transmise à la zone liquide.

$P_s$	: Puissance évacuée par conduction.
$R_f$	: Rayon de la tache focale.
$T$	: Température.
$T_f$	: Température de fusion.
$T_{plasma}$	: Température de plasma.
$T_{trans}$	: Température de transition.
$T$	: Température de vaporisation.
$V_s$	: Vitesse de soudage.
$X$	: Profondeur de pénétration.
$z_{pf}$	: Position de la tache focale.

## REFERENCES

1. Simulation du soudage T.I.G-Acier316L.validation sur cas testes de complexité croissante ; Loinel Depradeux, INSA Lyon 2003.
2. R.CAZES Technique de l'ingénieur- procédés de soudage- principes généraux et critères de choix, p2.
3. R.CAZES Technique de l'ingénieur- soudage par friction- p1-2.
4. R.CAZES Technique de l'ingénieur- soudage par faisceau à haute énergie- faisceau d'électron, p1-3.
5. R.CAZES Technique de l'ingénieur- soudage par faisceau à haute énergie- faisceau Laser, p3-6.
6. A.Kamel, soudabilités laser des alliages de magnésium ; Master énergétique ; Ecole d'ingénieurs de Monastir, Tunisie 2003-2004.
7. M.Dhahri : Soudabilité laser CO<sub>2</sub> des Alliages de Magnésium, thèse de doctorat, UNIMECA Marseille, France 2004.
8. K.Abderrazak, W.Ben Salem, H.Mhiria, G.Lepalec, M.Autric ; Modelling of CO<sub>2</sub> laser welding of magnesium alloys, France 10 octobre 2007.
9. N.PIERRON, P.SALLAMAND, S.MATTEI ; Modélisation du bain de soudage crée lors d'une pulse laser (Nd:Yag), avec un alliage d'aluminium ; 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 novembre 2005.
10. N.PIERRON, P.SALLAMAND, S.MATTEI, JM. Jouvard, E.Cicala ; determination of an ampirical law of aluminium and magnesium alloys absorption coefficient during Nd :YAG laser interaction ; Published 16 March 2007.
11. I.BENNAMIA ; Mémoire de Magistère ; Etude dynamique des structures d'avion par la méthode des éléments finis ; U.de Blida, Département d'aéronautique ; Novembre 2007.
12. Procédés innovants de traitements des alliages de magnésium : protection et assemblage ; Réseaux de recherche et d'innovation technologiques : Matériaux et procédés ; Collaboration scientifique : Ecole centrale de Lyon, Université Aix – Marseille, ENSAM Aix en Provence et des partenaires industriels (PMA fonderie Honsel)