

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière
Département de physique



Thèse de Doctorat
Filière : Physique
Spécialité: Matière et Rayonnement

Intitulée :

**Calcul des pertes d'énergie lors de soudure aux lasers
des plaques métalliques à base de Mg et Ti**

Préparée par : **Soumaya LEMKEDDEM**
Soutenue le : 01/07/2020

Devant le jury :

Mohammed Tayeb MEFTAH	Professeur	UKM Ouargla	Président
Rachid GHERIANI	Professeur	UKM Ouargla	Examineur
El Habib GUEDDA	Professeur	U El-Oued	Examineur
Keltoum CHENINI	MCA	U Ghardaïa	Examineur
Mosbah DIFALLAH	MCA	U El-Oued	Examineur
Fethi KHELFAOUI	Professeur	UKM Ouargla	Rapporteur

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicaces

À la mémoire de mon père ...

*Qui a été toujours dans mon esprit et dans mon cœur,
Je vous dédie aujourd'hui ce modeste travail,
Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.*

À ma chère mère ...

*Décédée il y a peu et qui serait contente et satisfaite d'apprendre que
j'ai enfin terminé ce travail.
Puisse Dieu, le tout puissant, lui accorder sa sainte miséricorde
et l'accueillir dans son vaste paradis.*

« A Dieu nous appartenons et à Lui nous retournons »

À mon mari ...

Pour son soutien et ses encouragements

À mes chers Imane et Abderrahmane ...

Que dieu les protège

Soumaya LEMKEDDEM

Remerciements

Tout d'abord je suis très reconnaissante à Monsieur le professeur **Fethi KHELFAOUI**, qui a proposé ce sujet, pour avoir assuré la direction de ce travail, pour son assistance et sa disponibilité, pour ses conseils et sa compréhension au long de ce travail. Je salue son esprit critique et ses encouragements qui m'ont permis de mener ce travail à terme.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Mohammed Tayeb MEFTAH**, Professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse, je lui adresse toute ma gratitude.

C'est un grand plaisir d'avoir Monsieur **Rachid GHERIANI**, Professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail. Qu'il reçoit ici mes remerciements.

Mes chaleureux remerciements sont adressés également à Monsieur **El-Habib GUEDDA**, Professeur à l'université d'El-Oued, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse.

Mes grands remerciements vont également à Madame **Keltoum CHENINI**, Maître de Conférences à l'Université de Ghardaïa et à Monsieur **Mosbah DIFALLAH**, Maître de Conférences à l'Université d'El-Oued, qui ont bien voulu s'intéresser à ce travail et faire partie du jury.

Ce travail a été effectué au laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière Université Kasdi Merbah Ouargla. Je tiens à remercier tout le personnel de ce laboratoire.

Je remercie également tous **mes collègues sans exception** aux facultés suivantes: Fac. des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Fac. des Sciences Appliqués, Fac. des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication et Faculté des Hydrocarbures. Je leur transmets ici l'expression de ma sympathie.

Je tiens à remercier tous les membres des familles **LEMKEDDEM** et **TRABELSI**, essentiellement ceux et celles qui étaient présents aux moments importants, et tout particulièrement ma chère mère et mon cher mari.

Enfin, à tous ceux qui ont participé à mon éducation et ma formation j'exprime ma gratitude.

Merci à tous!

Sommaire

<i>Dédicaces</i>	i
<i>Remerciements</i>	ii
<i>Sommaire</i>	iii
<i>Liste des figures</i>	vi
<i>Liste des tableaux</i>	ix
<i>Nomenclature</i>	x
Introduction générale	1
 <u>Chapitre 1</u> : Généralités sur le soudage aux lasers et le rayonnement émis	
1. Introduction	5
2. Domaines d'application des procédés de soudage	5
2.1. Industrie pharmaceutique et médicale	6
2.2. Industrie automobile et ferroviaire	6
2.3. Industrie aéronautique et spatiale	7
2.4. Industrie pétrolière et gazière	7
3. Méthodes utilisées pour l'étude des procédés de soudage	7
3.1. Méthodes expérimentales	7
3.1.1. Contrôles destructifs	8
3.1.2. Contrôles semi destructifs	8
3.1.3. Contrôles non destructifs	8
3.2. Modélisation et simulation numérique	8
3.2.1. Méthode de flux de chaleur et de fluide	9
3.2.2. Méthode thermomécanique et métallurgique	10
4. Soudage par laser	10
4.1. Types des lasers pour soudage	11
4.2. Interaction laser matière et applications	12
4.3. Principe du soudage laser	12
4.4. Paramètres du soudage laser	14
4.4.1. Caractéristique du faisceau	14
4.4.2. Focalisation	15
4.4.3. Puissance et vitesse	15
4.4.4. Gaz de protection	16
5. Présentation des alliages du magnésium et du titane	17
5.1. Présentation du titane et ses alliages	17
5.1.1. Propriétés générales du titane	17
5.1.2. Propriétés de l'alliage de titane TA6V	19
5.1.3. Utilisation de l'alliage TA6V	20
5.2. Présentation du magnésium et ses alliages	20
5.2.1. Propriétés générales du magnésium	20
5.2.2. Propriétés de l'alliage de magnésium AM60	20
5.2.3. Utilisation de l'alliage AM60	21
6. Phénomènes physiques au cours du soudage	21
7. Comportement thermique des plaques lors de soudage	22
7.1. Modèles des sources de chaleur	22
7.2. Étude du bain de fusion	23
7.3. Évolution des températures sur les plaques	24

7.4. Vitesses de refroidissement des plaques	25
7.5. Pertes d'énergies au niveau des plaques	26
8. Comportement radiatif des plaques lors de soudage	27
8.1. Plasmas thermiques et équilibre thermodynamique	27
8.2. Phénomènes radiatifs dans les plasmas thermiques	28
8.3. Lois du rayonnement thermique	29
8.3.1. Loi de Planck	29
8.3.2. Loi de Wien	30
8.3.3. Loi de Stefan-Boltzmann.....	30
8.4. Rayonnement émis lors des soudages	30
9. Conclusions	32
<u>Chapitre 2 : Modélisation du comportement thermique lors du soudage</u>	34
1. Introduction	34
2. Équation de conservation de l'énergie	36
2.1. Lois de conservation	36
2.2. Équation d'énergie	36
3. Propriétés des matériaux	37
3.1. Propriétés de l'alliage de titane TA6V	37
3.2. Propriétés de l'alliage de magnésium AM60	39
4. Modélisation mathématique et numérique cas 2D	40
4.1. Source de l'énergie	41
4.2. Hypothèses et équations gouvernante	42
4.3. Modèle numérique et conditions aux limites	43
5. Modélisation mathématique et numérique cas 3D	45
5.1. Sources de l'énergie	45
5.2. Hypothèses et équations gouvernantes	47
5.3. Modèle numérique et conditions aux limites	48
<u>Chapitre 3 : Résultats et discussions</u>	52
1. Introduction	52
2. Etude 2D du comportement thermique des plaques métalliques soudées par laser	52
2.1. Source d'énergie	53
2.2. Profil des températures pour le soudage de l'alliage TA6V	54
2.3. Profil des températures pour le soudage de l'alliage AM60	58
2.4. Conditions appropriées de soudage	58
2.5. Vitesses de chauffage et de refroidissement	59
2.6. Profil des températures pour différentes valeur de vitesse	61
2.7. Profil des températures pour différentes valeur de puissance	62
2.8. Profil des températures en fonction de rayon R	63
3. Étude des pertes d'énergie durant le soudage cas 2D	65
3.1. Influence des pertes sur le calcul des températures	65
3.2. Pertes par rayonnement et convection en fonction de t	65
3.3. Pertes par rayonnement et convection en fonction de x	68
3.4. Pertes par rayonnement et convection en fonction de R	71

4. Étude 3D du comportement thermique des plaques métalliques soudées par laser	71
4.1. Étude 3D du comportement thermique cas des plaques minces	71
4.1.1. Profil des températures	72
4.1.2. Comparaison entre l'étude 2D et 3D	72
4.2. Étude 3D du comportement thermique cas des plaques épaisses	74
4.2.1. Sources d'énergie	74
4.2.2. Profil des températures en fonction du temps	78
4.2.3. Profil des températures pour différentes valeurs de vitesse	80
4.2.4. Profil des températures pour différentes valeurs de puissance	82
5. Détermination des pertes d'énergie durant le soudage cas 3D	85
Conclusion générale et perspectives	86
Annexes	90
Références	93

Liste des figures

Figure	Légende	Page
I.1	Approche utilisée pour résoudre le problème	9
I.2	Principe de soudage laser CO ₂ [34]	11
I.3	Principe de soudage métallique par laser [47]	13
I.4	Paramètres du soudage par faisceau laser	14
I.5	Influence de la distance entre le point focale et la plaque sur la largeur du cordon de soudure [49]	15
I.6	Effet de la vitesse de soudage sur la profondeur de pénétration des joints d'alliage de magnésium WE43 soudés par laser CO ₂ [51]	16
I.7	Effet de la vitesse de soudage sur la largeur de cordon des joints d'alliage de magnésium WE43 soudés par laser CO ₂ [51]	16
I.8	Structure cristallographique du titane non allié : (A) : Phase α : HCP ($a=0,295$ nm, $c=0,4682$ nm) (B) : Phase β : CC ($a=0,332$ nm) (C) : État liquide	18
I.9	Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V [53]	19
I.10	Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages	21
I.11	Modélisation du bilan énergétique au cours du soudage laser	22
I.12	Domaine du rayonnement thermique dans le spectre électromagnétique	32
II.1	Densité de l'alliage TA6V en fonction de la température [62]	38
II.2	Valeurs de l'émissivité de l'alliage de titane TA6V pour différentes températures	39
II.3	Source surfacique gaussienne	41
II.4	Présentation du problème 2D	42
II.5	Géométrie, maillage et conditions aux limites	44
II.6	Source volumique gaussienne	46
II.7	Source volumique conique suivant une distribution gaussienne (a) Source volumique décroissante dans l'épaisseur (b) : Définition des paramètres de la source	46
II.8	Géométrie et conditions aux limites	47
II.9	Organigramme du calcul numérique	51
III.1	Profil de la source surfacique en fonction de x utilisée dans le cas 2D	54
III.2	Profils des températures pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s pour les positions ($x=0.0$ mm, $y=4.0$ mm) et ($x=5.5$ mm, $y=4.0$ mm).	54
III.3	Profils des températures pour différentes positions sur le cordon ($P=2500$ W, $V=0.060$ m/s) [122]	56
III.4	Températures calculées en fonction du temps pour un point sur le cordon de soudure pour trois conditions de soudage [26]	56
III.5	Résultats simulés et expérimentaux de distribution de température pour deux points A et B près du cordon de soudure pour une vitesse de soudage $V=3$ mm/s [75]	57
III.6	Variations des températures en fonction de position x à l'instant $t=0.05$ s pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s [122]	57

III.7	Profils des températures en fonction du temps pour différents positions x lors de soudage laser de l'alliage de magnésium AM60	58
III.8	Évolution de la vitesse de chauffage et de refroidissement en fonction du temps au point ($x=0.0$ mm, $y=4.0$ mm)	60
III.9	Évolution de la vitesse de chauffage et de refroidissement en fonction du temps au point ($x=5.5$ mm, $y=4.0$ mm)	61
III.10	Profils des températures pour $P=2500$ W et pour différentes vitesses au point ($x = 0$ mm, $y = 3.0$ mm) [122]	62
III.11	Profils des températures pour $V=0.060$ m/s et pour différentes valeurs de puissance	63
III.12	Profils des températures au centre du cordon de soudure pour $R= 0.25$ mm et $R=0.50$ mm	64
III.13	Températures maximales au centre du cordon de soudure en fonction du rayon de la source R	64
III.14	Pertes d'énergie par rayonnement en fonction de t pour différentes positions pour $V = 0.060$ m/s et $P = 2500$ W [122]	66
III.15	Pertes d'énergie par convection en fonction de t pour différentes positions pour $V=0.060$ m/s et $P=2500$ W [122]	66
III.16	Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point ($x=0.15$ mm, $y=2.75$ mm).	67
III.17	Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point ($x=0.20$ mm, $y=2.75$ mm)	68
III.18	Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point ($x=0.45$ mm, $y=2.75$ mm)	68
III.19	Pertes d'énergie en fonction de la position x pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s	69
III.20	Pertes d'énergie en fonction de la position x pour différentes valeurs de puissance pour $y = 2.0$ mm	70
III.21	Pertes pour deux plaques en fonction du rayon de la source d'énergie	71
III.22	Profils des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure pour $P=2500$ et $V=0.060$ m/s	72
III.23	Comparaison des profils des températures obtenues par les deux cas d'études 2D et 3D pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s	73
III.24	Variation de la source 1 en fonction de z	74
III.25	Profil de la source 1 au niveau de Z_{\max} en fonction de x pour différentes valeur de y	75
III.26	Variation de la source 2 en fonction de z	75
III.27	Profil de la source 2 au niveau de Z_{\max} en fonction de x	76
III.28	Variations des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure $P=2500$ W et $V=0.050$ m/s en utilisant la source 1	76
III.29	Variations des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure $P=2500$ W et $V=0.050$ m/s en utilisant la source 2	77
III.30	Profils des températures pour les deux forme de source au point ($x=0.0$.mm, $y=3.5$ mm, $z=Z_{\max}$) pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s	77
III.31	Variations des températures en fonction du temps sur la surface supérieure du cordon de soudure pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s	78
III.32	Variations des températures en fonction du temps près du cordon de soudure pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s	79

III.33	Variations des températures en fonction du temps sur la surface supérieure pour $x=2.5$ mm et $x= 5.5$ mm	79
III.34	Variations des températures en fonction du temps pour $z=7.50$ mm $z=7.25$ mm et $z=7.00$ mm	80
III.35	Évolution des températures pour $P=2500$ W et différentes valeurs de vitesse au point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)	81
III.36	Évolution des températures pour deux différentes valeurs de vitesse au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm, $z=4.5$ mm)	82
III.37	Évolution des températures pour deux différentes valeurs de vitesse au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm, $z=5.5$ mm)	82
III.38	Évolution des températures pour $V=0.050$ m/s et différentes valeurs de puissances au point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)	83
III.39	Évolution des températures pour $V=0.060$ m/s et deux différentes valeurs de puissance au point ($x=0.6$ mm, $y=3.0$ mm, $z=Z_{max}$)	84
III.40	Évolution des températures pour $V = 0.060$ m/s et deux différentes valeurs de puissance au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm, $z=4.5$ mm)	84
III.41	Perte d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t (a) : Près du cordon, (b) : Loin du cordon	85

Liste des tableaux

Tableau	Légende	Page
I.1	Longueurs d'onde et énergies des lasers de soudage	12
I.2	Comparaison de la densité et de la conductivité thermique des alliages de magnésium par rapport à d'autres types d'alliage [66]	20
I.3	Températures et $\lambda_{O_{max}}$ suivant la loi de Wien	32
II.1	Les variables Φ , Γ et S pour les équations de conservation [116]	36
II.2	Chaleur spécifique et conductivité thermique de l'alliage de titane en fonction de la température	38
II.3	Propriétés physiques de l'alliage TA6V en fonction de l'état de matière	39
II.4	Propriétés physiques de l'alliage AM60 en fonction de la température [66]	40
II.5	Propriétés physiques de l'alliage AM60 en fonction de l'état de la matière	40
II.6	Valeurs des paramètres de la source d'énergie	47
III.1	Paramètres du modèle géométrique et du soudage	53
III.2	Instants correspondants aux températures maximales pour deux points qui ont la même ordonnée y	55
III.3	Conditions appropriées au soudage des plaques en TA6V [122]	59
III.4	Conditions appropriées au soudage des plaques en AM60	59
III.5	Vitesses maximales de chauffage et de refroidissement sur et loin du cordon de soudure	61
III.6	Températures maximales pour $P=2500$ W et différentes vitesses au point ($x = 0$ mm, $y = 3.0$ mm)	62
III.7	Températures maximales atteintes pour $V = 0.060$ m/s et différentes valeurs de puissance au point ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm)	63
III.8	Variations de température avec et sans perte d'énergie [122]	65
III.9	Pertes d'énergie durant le soudage pour une plaque [122]	69
III.10	Quantité d'énergie perdue par les deux plaques de TA6V	70
III.11	Comparaison des vitesses de chauffage et de refroidissement lors de soudage pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s	73
III.12	Températures maximales atteintes pour $P=2500$ W et différentes vitesses	81
III.13	Températures maximales atteintes pour $V=0.050$ m/s et différentes valeurs de puissances sur le point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)	83

Nomenclature

Symboles	significations	Unités
a, c	Paramètres de maille	nm
c	Vitesse de la lumière	m/s
C	Chaleur spécifique	J/kg K
C_s	Chaleur spécifique à l'état solide	J/kg K
C_l	Chaleur spécifique à l'état liquide	J/kg K
$C_{(i)}$	Chaleur spécifique en fonction de phase solide et liquide)	J/kg K
$d\phi$	Flux de chaleur	W/m ²
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Pas d'espace	m
Δt	Pas du temps	s
e	Épaisseur des plaques	mm
E	Énergie déposé	J/mm
E_P	Énergie du photon	J
ε	Émissivité	
ε_s	Émissivité de l'état solide	
ε_l	Émissivité de l'état liquide	
h	Constante de Planck	m ² kg/s
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/m ² K
i, j, k	Indices des pas de l'espace	
k_B	Constante de Boltzmann	J/K
L_x, L_y, L_z	Dimensions des pièces	mm
L_ω^0, L_λ^0	Luminance spectrale du corps noir	W/m ² sr s
λ_0	Longueur d'onde	m
λ_{0max}	Longueur d'onde de l'émission maximale	m
λ	Conductivité thermique	W/m K
$\lambda_{(i)}$	Conductivité thermique en fonction de phase (solide et liquide)	W/m K
λ_s	Conductivité thermique de l'état solide	W/m K
λ_l	Conductivité thermique de l'état liquide	W/m K
λ_{sl}	Conductivité thermique du changement solide/liquide	W/m K
m	masse	Kg
M_0	Émittance totale	W/m ²
η	Coefficient d'absorption	
n	Indice de pas du temps	
P	Puissance du laser	W
ρ	Densité	kg/m ³
$\rho_{(i)}$	Densité en fonction de phase (solide et liquide)	kg/m ³
ρ_s	Densité à l'état solide	kg/ m ³
ρ_l	Densité à l'état liquide	kg/ m ³
Q	Densité de puissance	W/m ³
R	Rayon de la source de l'énergie	mm
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
t	Temps	s
T	Température	K
T_0	Température ambiante	K
T_β	Température transus β	K
T_r	Température référence	K
T_f	Température de fusion	K

T_v	Température de vaporisation	K
T_e	Température électronique	K
T_h	Température des particules lourdes	K
T_{\max}	Température maximale	K
V	Vitesse du soudage	m/s
v_R	Vitesse de refroidissement	K/s
ν	Fréquence	Hz
ω_{\max}	Fréquence de l'émission maximale	Hz
W	Energie perdue	J
W_{ray}	Energie perdue par rayonnement	J
W_{conv}	Energie perdue par convection	J
x, y, z	Coordonnées cartésiennes	mm

Introduction générale

« Le mystère pique la curiosité. »
[Proverbe africain]

Introduction générale

Il existe de nombreux produits industriels qui sont constitués par des assemblages de pièces essentiellement par soudage. Les procédés de soudage consistent à relier deux pièces par un échauffement local. Le soudage occupe une place importante dans les domaines d'industrie. Il est très répandu dans l'industrie pharmaceutique et médicale [1], l'industrie automobile et ferroviaire [2, 3], l'industrie aéronautique et spatiale [4, 5] et l'industrie pétrolière et gazière [6].

Les procédés soudage par fusion sont largement utilisés pour assembler les plaques métalliques. Afin de réaliser la fusion des pièces, de différentes sources d'énergies sont disponibles. Divers procédés existent comme par exemple le soudage à l'arc, le soudage plasma, le soudage par friction, et le soudage laser [7]. Le soudage laser est un des procédés de soudage les plus efficaces dans l'industrie en raison de sa productivité élevée et de sa flexibilité [8]. Les principaux avantages du soudage au laser par rapport aux procédés de soudage conventionnels sont dus à la concentration de la puissance dans une très petite zone. Ce qui mène à des soudures étroites, profondes avec une zone affectée thermiquement très réduite.

Au cours du soudage laser, une grande énergie fond rapidement la surface de la pièce. La grande densité de puissance permet de générer une cavité appelée capillaire (ou encore keyhole) autour du faisceau. Ce bain de fusion ainsi créé est préservé puis déplacé entre les pièces à assembler. Le métal se solidifie après passage du faisceau et un assemblage des pièces se réalise.

La modélisation numérique des procédés de soudage est difficile et reste essentiellement une affaire d'expert [9]. C'est essentiellement à cause des déformations et des modifications thermiques. Pour calibrer le modèle, il est nécessaire d'associer ou de comparer les essais numériques à des essais expérimentaux. Les modèles des procédés de soudage dans la littérature utilisent, selon le but de recherche, des codes de calcul ou des logiciels soit de la mécanique des fluides [10, 11] ou bien de structure [12-14].

Les travaux concernant la modélisation thermique et la prédiction de soudage au laser des métaux sont nombreux comme l'indique l'étude de l'état de l'art faite par A. P. Mackwood et al. en 2005 [15] et celle de J. Svenungsson et al. en 2015 [16].

Généralement, on distingue dans ces travaux, ceux qui s'intéressent à l'utilisation du mode keyhole (fortes puissances), et ceux qui traitent du mode conduction (faibles puissances).

Le titane et ses alliages ainsi que le magnésium et ses alliages présentent, généralement, d'excellentes caractéristiques pour le soudage par fusion. Généralement les alliages de titane ont une densité de 40% moins que les aciers et une résistance exceptionnelle à la corrosion [17]. L'alliage de titane TA6V est largement utilisé dans des applications industrielles. C'est un matériau de choix dans les industries chimique. Il est largement utilisé dans le domaine aéronautique et aérospatial [17], présentant un bon compromis entre résistance et ductilité [18, 19]. La plupart des alliages de magnésium ont une bonne soudabilité et possèdent des propriétés intéressantes. Ils tendent à remplacer les aciers et les alliages d'aluminium dans plusieurs secteurs industriels. Les alliages de magnésium AM60, AZ91 et autres sont utilisés dans les domaines automobile, aéronautique et électronique [20-22].

L'évolution des températures sur les plaques soudées par laser est l'objet de plusieurs travaux afin d'étudier le comportement thermiques, ainsi que le comportement mécanique et métallurgique dans la plupart des travaux publiés. Dans ces travaux, la considération des pertes d'énergie au niveau des plaques varie d'un travail à autre.

Davis et al. [23] ont développé en 1986, un modèle numérique afin d'étudier le soudage laser de plusieurs métaux. Ils ont trouvé des dépendances entre les différents paramètres sans prendre les pertes d'énergie en considération. En 2009, Abderrazak et al. [24] ont utilisé un modèle numérique pour étudier la formation du bain de fusion, durant un soudage laser, sans prendre en considération les pertes par radiation. Seules les pertes par convection ont été considérées dans le travail de Bannour et al. [25] en 2012. Dans ce travail les effets de la dépendance des propriétés physiques avec la température ont été étudiée pour un soudage laser de l'alliage de magnésium AZ91.

Plusieurs auteurs ont montré que l'énergie perdue par radiation et par convection existe au niveau de la surface des plaques [26, 27]. En 2010, Belhadj et al. [28] ont développé un modèle pour simuler l'évolution thermique des plaques durant le soudage laser de l'alliage de magnésium AM60. Dans ce travail, les pertes par convection sont

considérées au niveau de la surface et les pertes par rayonnement au niveau de la surface irradiée par laser.

Un modèle thermique a été développé par K. Abderrazak et al. [29] en 2008 pour prédire les différents paramètres durant le soudage laser de l'alliage de magnésium WE43. Dans ce travail, les pertes par radiation et convection sont considérées au niveau de la région de soudage et elles sont estimées être environ 20% de la puissance laser.

Le rayonnement d'un plasma de soudure présente un spectre d'émission qui dépend, en particulier, du gaz de protection et de la nature du métal qui s'évapore. Des mesures des températures, autant que méthodes pratiques et sans contact, ont été largement utilisées dans les procédés de soudage. L'intensité du rayonnement thermique est liée à la température de la surface émettrice [30]. D'une façon générale, les émissions émises lors des soudures peuvent être étudiées afin de mettre en évidence certains paramètres qui, par la suite, peuvent être étudiés pour vérifier leurs utilités dans le contrôle d'une soudure.

À notre connaissance, il y a peu de travaux scientifiques qui traitent le calcul des taux d'énergie perdus pendant le soudage; par conséquent, nous avons visé à quantifier la quantité d'énergie perdue par rayonnement lors du soudage laser CO₂ des plaques des plaques métalliques à bases de Mg et Ti.

L'objectif de ce travail est d'étudier le rayonnement thermique de la soudure de plaques métalliques par les lasers. Pour cela, nous allons présenter une étude numérique pour prédire le comportement thermique des plaques métalliques au niveau du cordon ainsi que sur toute la plaque. Cela permettrait dans un premier temps de calculer les pertes par rayonnement et par convection. Par conséquent le rayonnement thermique émis par le milieu sera déterminé.

Dans cette thèse de doctorat nous avons à réaliser les objectifs suivants :

1. L'étude du soudage des matériaux par laser ;
2. La modélisation mathématique et numérique du comportement thermique lors du soudage laser des plaques minces (cas 2D) ;
3. La modélisation mathématique et numérique du comportement thermique lors du soudage laser des plaques épaisses (cas 3D) ;
4. Calcul des pertes par convection et rayonnement.

Cette thèse comporte trois chapitres. Tout d'abord, **le premier chapitre** qui présente les principaux éléments bibliographiques relatifs aux principaux thèmes abordés. L'importance des procédés de soudage dans des différents domaines seront citées à titre d'exemple. Ensuite, les méthodes utilisées pour l'étude des procédés de soudage sont présentées brièvement. En plus, nous allons exposer d'une façon succincte un rappel sur le procédé de soudage par laser. Nous allons exposer par la suite quelques travaux reliés aux études du comportement thermique des plaques métalliques lors de soudage. À la fin de ce chapitre, les phénomènes radiatifs dans un plasma thermique sont présentés. Ces phénomènes comportent les spectres de raies et les rayonnements thermiques, les rayonnements thermiques font le sujet de cette thèse.

Le deuxième chapitre est consacré principalement à la modélisation numérique suivi dans ce travail. Le comportement thermique des plaques métalliques lors d'un soudage laser CO₂ est étudié à partir d'une modélisation de la source qu'on suppose gaussienne surfacique et volumique. On résout l'équation de conduction de la chaleur. Les termes relatifs aux pertes par convection et par rayonnement sont couplés aux termes relatifs à la température. Nous présentons la modélisation sur des plaques minces (cas 2D) et sur des plaques épaisses (cas 3D).

Le dernier chapitre est consacré aux résultats numériques obtenus. Nous allons commencer par la présentation des profils des températures des plaques lors du soudage en fonction du temps et des positions. Les résultats obtenus seront comparés à des résultats expérimentaux issus de quelques travaux publiés. Une étude paramétrique sera effectuée pour étudier l'influence de quelques paramètres de soudage (principalement la vitesse de soudage et la puissance) sur le comportement thermique des plaques. Les pertes par rayonnement et par convection dans des conditions choisies seront calculées. Cela permettrait de prévoir et d'étudier le profil du rayonnement émis à partir des propriétés du milieu.

CHAPITRE 1

Généralités sur le soudage aux lasers et le rayonnement émis

*« Étudier et ne rien comprendre, c'est chasser sans atteindre
de gibier. »*

[Proverbe danois]

Chapitre 1 :

Généralités sur le soudage aux lasers et le rayonnement émis

1. Introduction

Dans ce premier chapitre des généralités sur les procédés de soudage et sur le rayonnement émis seront présentés. Tout d'abord nous allons montrer l'importance du soudage dans des différents domaines. Quelques propriétés qui caractérisent l'utilisation des procédés de soudage dans chaque domaine seront citées à titre d'exemple. Nous présentons par la suite les méthodes utilisées pour l'étude des procédés de soudage. Le soudage laser sera présenté ainsi que ses paramètres. Quelques travaux consacrés à l'étude du comportement thermique des plaques lors de soudage laser seront exposés. Ces travaux traitent, essentiellement, l'étude de la source de l'énergie et de l'évolution des températures. Par la suite, les phénomènes radiatifs dans un plasma thermique seront définis. Enfin, nous concluons avec une description de la démarche scientifique utilisés dans ce travail.

2. Domaines d'application des procédés de soudage

Parmi tout les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans les domaines de l'industrie. Le soudage permet essentiellement de bien adapter aux contraintes pendant le service. En outre, et selon le domaine d'application, chaque procédé de soudage a ses avantages et ses inconvénients. Il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de facteurs, on cite :

- la forme et l'épaisseur du matériau à souder ;
- la nature du matériau à souder ;
- les caractéristiques requis du joint soudé ;
- l'accès au joint et le positionnement correct de l'appareil ;
- la position de soudage (à plat, verticale, au plafond...) ;
- le lieu (les procédés avec gaz conviennent à un environnement protégé) ;
- le rendement du procédé.

Il existe plusieurs procédés de soudage qui ont tous un seul objectif c'est d'assurer la continuité de la matière à assembler [31]. Leurs principes et leurs mises en œuvre sont différents. Ces procédés peuvent se classer selon les énergies mise en œuvre. Généralement la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) est utilisée pour comparer les différents procédés [32]. Quelques types de procédés de soudage par fusion sont cités par la suite :

- soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) ;
- soudage sous flux en poudre ou soudage à l'arc submergé (SAW) ;
- soudage à l'arc sous gaz protecteur avec fil plein (GMAW : Avec gaz inerte MIG/ avec gaz actif MAG) ;
- soudage à l'électrode réfractaire (GTAW ou TIG) ;
- soudage par torche à plasma (PAW) ;
- soudage par laser (LW).

Dans les sections suivantes, certains domaines d'applications seront cités avec quelques propriétés qui caractérisent l'utilisation des procédés de soudage dans chaque domaine.

2.1. Industrie pharmaceutique et médicale

L'industrie pharmaceutique et médicale est soumise à des exigences imposées et à de nombreuses normes. Ces normes sont liées à la qualité des dispositifs médicaux ainsi qu'aux matériaux de l'emballage. Les instruments médicaux sont de plus en plus petits et ils sont produits par soudage laser qui permet d'avoir des soudures étanches et dans la gamme de quelques microns. En plus l'aspect esthétique du soudage laser encourage l'utilisation de ce procédé dans l'industrie médicale en particulier les implants [1]. Les instruments pharmaceutiques exigent des critères qui ne peuvent pas être réalisables avec le soudage manuel qui peut laisser des amas de matière. La solution idéale pour le soudage des tubes dans ce cas est le soudage orbital.

2.2. Industrie automobile et ferroviaire

Le soudage et ses procédés ont beaucoup d'application dans l'industrie automobile et ferroviaire [2, 3, 33]. Pour assembler les tôles dans la construction automobile le soudage par point est largement utilisé. D'autres procédés sont employés comme le soudage MAG (Metal Active Gas) ; c'est le plus utilisé dans le monde [2].

Les procédés sont aujourd'hui tous automatisés. Par rapport aux procédés courants, le soudage laser est utilisé pour souder beaucoup de parties à causes des avantages offerts.

2.3. Industrie aéronautique et spatiale

Les procédés de soudage sont nécessaires dans l'industrie aéronautique et spatiale [4, 5, 34]. Dans le but de réduction de poids, les alliages légers (de titane et d'aluminium) sont généralement utilisés. Tandis que pour la partie chaude du moteur les alliages plus lourds (de nickel) sont utilisés pour leur excellente résistance à l'oxydation et aux hautes températures. Dans le domaine de l'assemblage des moteurs, les procédés de soudage au laser sont de plus en plus utilisés.

2.4. Industrie pétrolière et gazière

Le soudage est une opération nécessaire dans le secteur de la construction des pipelines utilisés dans les réseaux de transport de pétrole et de gaz [6, 35]. La qualité des soudures est demandée pour la productivité des pipelines. En plus le besoin de tuyaux de plus grand diamètre et de paroi plus fine et de méthodes de soudage rapides et assurées sont exigés. Pour protéger les canalisations, il faut que plusieurs mesures soient prises pour que chaque pipeline peut être utilisée pendant au moins une vingtaine d'années. Généralement, les pipelines sont en acier au carbone. Ce matériau est facile à souder, il peut être protégé contre la corrosion et il peut supporter les conditions de fonctionnement (température, pression...). Le type de soudage le plus répandu dans ce cas est le procédé de soudage à l'arc électrique.

3. Méthodes utilisées pour l'étude des procédés de soudage

Les procédés de soudage ont pris une grande importance parmi les procédés industriels d'assemblages dans différents domaines. Pour étudier les phénomènes associés aux soudages, et comme dans la plupart des études scientifiques on a recourt principalement à l'expérimentation, la modélisation et la simulation numérique.

3.1. Méthodes expérimentales

Les méthodes expérimentales sont utilisées essentiellement pour caractériser la qualité d'une soudure et confirmer le bon choix des paramètres de soudage. Ces méthodes se répartissent en trois parties : contrôles destructifs, contrôles semi destructifs et contrôles non destructifs. Le choix de la méthode dépend du mode de production, du procédé de soudage, de la nature des matériaux,...

3.1.1. Contrôles destructifs

Ce genre de méthodes s'exerce sur des échantillons qui subiront des essais destructifs tels que :

- L'essai de dureté ;
- L'essai de fatigue ;
- L'examen micrographique ;
- L'examen macrographique.

3.1.2. Contrôles semi destructifs

C'est une méthode rarement utilisée, elle se pratique en faisant une entaille localement sur le joint de telle façon que sa réparation soit aisée. Elle permet d'observer la pénétration et les défauts physiques.

3.1.3. Contrôles non destructifs

Ce sont des examens qui ne mettent pas l'assemblage réalisé en risque. Les contrôles non destructifs sont appliqués généralement sur les joints de soudure, on cite comme exemple :

- L'examen visuel ;
- Le contrôle par magnétoscopie ;
- La radiographie par rayons X et γ ;
- Les courants de Foucault ;
- Les techniques des ultrasons.

3.2. Modélisation et simulation numérique

La modélisation des procédés de soudage est une démarche qui permet de représenter et de simplifier le comportement des phénomènes lors et après le soudage. Quatre étapes sont utilisées pour faire une modélisation ; elles sont présentées sur la sur la **figure I.1**. Tout d'abord il faut bien définir et comprendre le phénomène à étudier. Une formulation mathématique est choisie. Dans le cas d'Equations aux Dérivées Partielles (EDP), des méthodes numériques permettent d'avoir des solutions approximatives au problème. Ensuite l'utilisation d'un langage ou un logiciel pour exécuter les calculs pour obtenir des résultats. Enfin on passe à la présentation et à l'exploitation des résultats sous forme de tableaux et courbes.

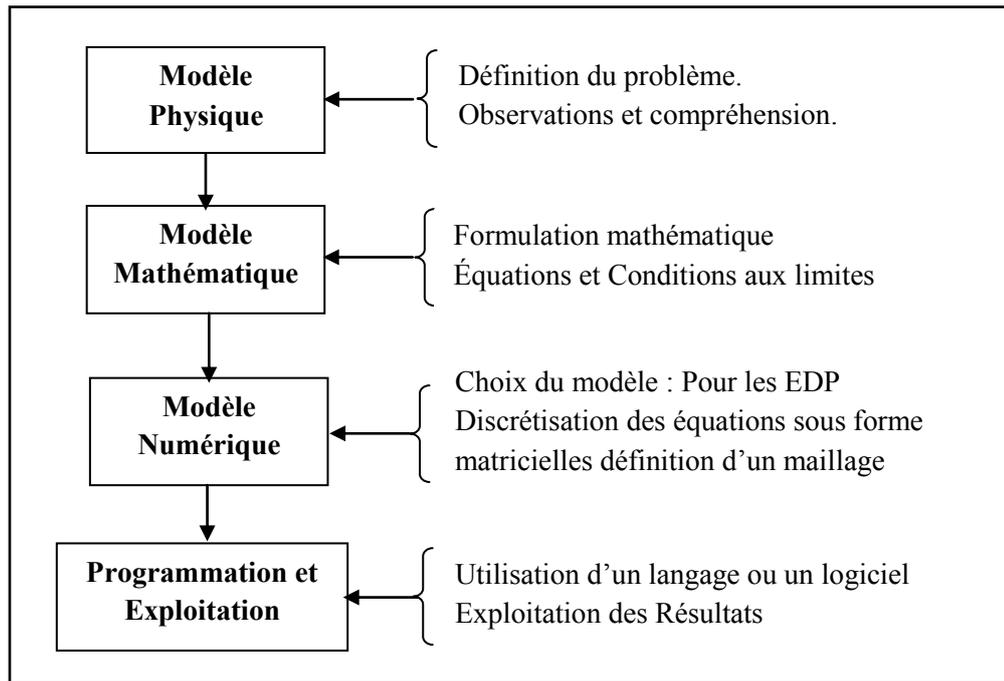


Figure I.1 : Approche utilisée pour une résolution numérique du problème.

La modélisation est un outil qui permet de comprendre les variables et les paramètres qui influencent ce comportement pour prédire son évolution et de simuler des situations à venir. Les modèles des procédés de soudage dans la littérature utilisent deux méthodes selon le but de recherche [36, 37] : la méthode de flux de chaleur et de fluide et la méthode thermomécanique et métallurgique.

3.2.1. Méthode de flux de chaleur et de fluide

La méthode de flux de chaleur et de fluide est une approche HFF (Heat and Fluid Flow). Cette méthode est utilisée si l'étude du comportement de bain de fusion présente le but de la recherche [38, 39]. Les transferts thermiques et l'électromagnétisme ainsi que la mécanique des fluides sont utilisés dans le but de trouver la forme de la source, la surface libre et les champs des températures dans et au voisinage de la zone fondue. Des codes de calcul de la mécanique des fluides ou des logiciels dédiés peuvent être utilisés par exemple :

- **Fluent** : C'est un logiciel qui contient des capacités de modélisation physique nécessaires pour modéliser le flux, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions pour des applications industrielles [10].
- **COMSOL Multiphysics** : C'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Il permet de simuler de nombreux

phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés [40].

- **Flow3D** : C'est un logiciel qui fournit une plate-forme complète et polyvalente de simulation pour l'étude du comportement dynamique des fluides lors des processus physiques et surtout pour des applications industrielles [11].

3.2.2. Méthode thermomécanique et métallurgique

La méthode thermomécanique et métallurgique est une approche TMM (Thermo-Mechanics & Metallurgy). Cette méthode est utilisée si le but de la recherche est de déterminer l'histoire thermomécanique, la distribution des phases métallurgiques et la prédiction des défauts et des propriétés [9, 41]. Des codes de calcul de structure ou des logiciels dédiés peuvent être utilisés par exemple :

- **WeldSimS** : C'est un logiciel de simulation numérique qui utilise les éléments finis et qui permet de trouver les champs des températures et les contraintes dans des structures en acier soudées [42].
- **TRANSWELD** : C'est un logiciel utilisé pour prédire le comportement thermomécanique des assemblages [13].
- **SYSWELD** : C'est un code de calcul industriel destiné à simuler les procédés de soudage pour étudier quelques propriétés d'un assemblage soudés comme l'amplitude des distorsions et l'apparition des défauts [14].

4. Soudage laser

Afin de réaliser la fusion des pièces, de différentes sources d'énergies sont disponibles suivant les caractéristiques des matériaux. Les torches à plasma ainsi que les lasers sont parmi les procédés de soudage par fusion largement utilisés pour assembler les plaques métalliques.

Les torches à plasma ont été développées pour des applications de projection thermique, de découpe et de soudage des matériaux. Les applications des torches plasma sont classées suivant l'énergie utilisée. Des puissances qui varient entre 0.1 et 100 kW sont souvent utilisées dans les soudages des lames jusqu'aux tôles [43].

D'autre part, les lasers présentent des sources d'énergies intéressantes et innovantes pour différentes applications. Dans les sections suivantes les types de lasers utilisés pour le soudage, le principe du procédé soudage laser ainsi que les paramètres de ce procédé seront présentés.

4.1. Types de lasers pour soudage

Selon la nature du milieu excité, les lasers sont classés en cinq types : laser à solide, laser à gaz, laser à semi-conducteurs, laser à liquide et laser à électrons libres. Dans le cas de traitement des matériaux et principalement pour le soudage des métaux, les lasers utilisés sont les lasers CO₂ et lasers Nd-YAG [44].

Dans le type des lasers CO₂, le milieu actif est un mélange gazeux constitué de dioxyde de carbone CO₂ (10%), d'azote N₂ (40%) et d'hélium He (50%) sous pression réduite. Des décharges électriques excitent les molécules d'azote, qui transfèrent leur excitation aux molécules de CO₂. Ces derniers émettent un rayonnement d'une longueur d'onde de 10.6 μm qui est transportable par miroirs (**Figure I.2**). La puissance des lasers CO₂ industriels atteint 1.5 à 40 kW. En général ce procédé est utilisé en régime de fonctionnement continu. La focalisation du faisceau peut être réalisée par des miroirs ou des lentilles de focalisation.

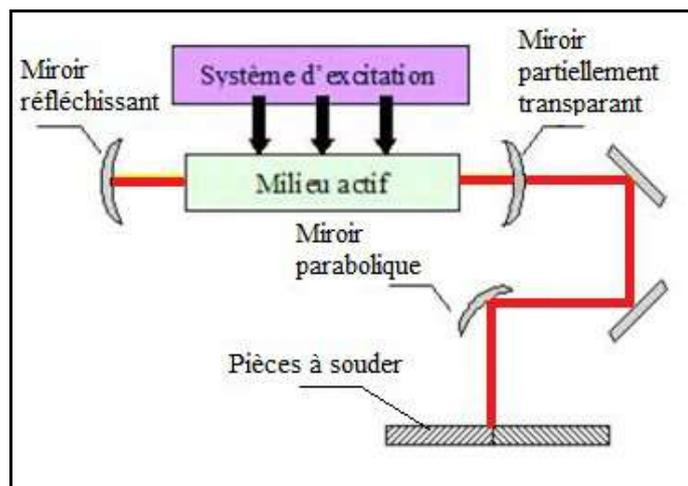


Figure I.2 : Principe de soudage laser CO₂ [34].

Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Garnet) sont des lasers solides dont le milieu actif, de nature cristalline, est un grenat d'aluminium yttrium (Y₃Al₅O₁₂) dopé à 10²⁰ ions trivalent néodyme (Nd³⁺). Le rayonnement a une longueur d'onde de 1.06 μm. Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 kW. Malgré leur faible puissance, ils sont par excellence l'outil de microsoudure de précision. Dans ce type de laser le faisceau Nd-YAG peut être transporté par fibre optique sur plusieurs dizaines de mètres. Le procédé peut être choisi suivant l'exigence des soudures des métaux (la profondeur, l'énergie).

4.2. Interaction laser matière et applications

L'interaction du rayonnement laser avec des matériaux en cours de traitement donne une vibration structurale du matériau. La vibration est détectée sous forme de chaleur qui peut être suffisamment élevée pour faire fondre le matériau. Alors l'énergie du rayonnement est transformée en énergie thermique. L'énergie du photon dépend de la fréquence ν donc de la longueur d'onde de propagation λ_0 , elle est donnée par la relation :

$$E_p = h\nu \quad (I.1)$$

Où $\nu = c/\lambda_0$, c'est la célérité de la lumière et h est la constante de Planck.

On peut écrire :

$$E_p(\text{eV}) = 1.2398 \times 10^3 / \lambda_0(\text{nm}) \quad (I.2)$$

Les rayonnements émis par les lasers de puissance se situent entre l'infrarouge et l'ultraviolet. Les longueurs d'ondes et les énergies E_p pour les types de laser utilisés dans les traitements de la matière principalement dans les procédés de soudage sont présentées sur le **tableau I.1**.

Tableau I.1 : Longueurs d'onde et énergies des lasers de soudage

Type de laser	$\lambda_0(\mu\text{m})$	$E_p(\text{eV})$
Laser CO ₂	10.6	0.117
Laser Nd-YAG	1.06	1.17

Les lasers ont beaucoup d'applications dans des domaines aussi variés que la médecine, la métrologie, ou la métallurgie. Après son développement, le laser a trouvé beaucoup d'applications industrielles, comme le découpage, le perçage, le soudage et les traitements des surfaces [45]. La qualité des plaques, la densité de puissance et le temps d'interaction entre le laser et la plaque ont une importance fondamentale pour déterminer le type de procédé à choisir.

4.3. Principe du soudage laser

Le soudage par faisceau laser est un procédé de soudage dit à haute énergie (densité de puissance entre 10^{10} et 10^{13} W/m² contre 5×10^6 à 5×10^8 W/m² pour les procédés de soudage à l'arc [34, 46]. Le rayonnement laser est focalisé pour obtenir de grandes densités de puissance. Au cours du soudage, une grande énergie fond

rapidement la surface de la pièce. La grande densité de puissance permet de générer une cavité appelée capillaire (ou encore keyhole) autour du faisceau. Ce bain de fusion ainsi créé est préservé puis déplacé entre les pièces à assembler. Le métal se solidifie après passage du faisceau et un assemblage des pièces se réalise : le principe est décrit sur la **figure I.3**.

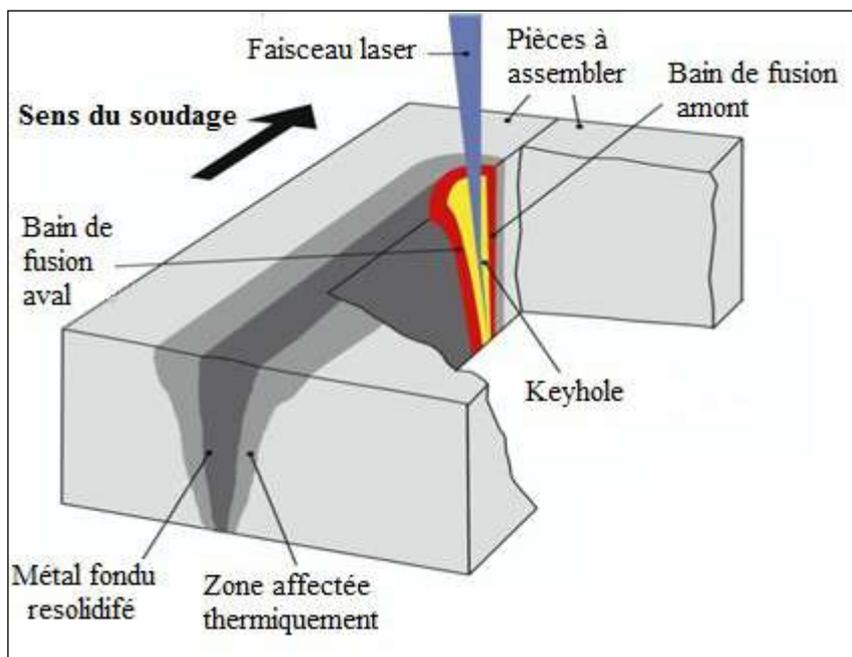


Figure I.3 : Principe de soudage métallique par laser [47]

Le capillaire permet un transfert de l'énergie directement au cœur du matériau et sa stabilité conditionne en partie la qualité de la soudure. L'interaction du faisceau laser avec les vapeurs métalliques conduit à une ionisation partielle qui forme un plasma composé de vapeurs ionisées. Ce procédé d'assemblage produit une zone de fusion profonde et étroite. Il existe deux modes de soudage laser selon la densité de puissance :

- Pour de faible densité de puissance ($< 10^{10}$ W/m²), c'est le soudage laser par conduction. Les cordons de soudure dans ce cas sont peu profonds (< 3 mm) et étroits. Ce processus est proche du soudage conventionnel sauf que le soudage laser par conduction permet d'obtenir des zones affectées thermiquement (ZAT) moins larges donc moins de déformations dues aux pressions [44].
- Pour des densités de puissance laser plus élevées ($> 5 \cdot 10^{10}$ W/m²), c'est le soudage laser de forte profondeur (effet keyhole). Dans ce cas un capillaire de vapeur étroit et profond se forme dans le bain de fusion. Ce type de soudage permet d'avoir une zone thermiquement affecté (ZAT) étroite.

Les travaux concernant la modélisation thermique et la prédiction de soudage au laser dans les métaux sont nombreux comme l'indique l'étude de l'état de l'art faite par A. P. Mackwood en 2005 [15]. On distingue parmi les travaux proposés, ceux qui s'intéressent à l'utilisation du mode conduction, et ceux qui traitent le mode keyhole. Le mode keyhole est le plus difficile à simuler numériquement [44], il présente un domaine qui est encore en cours de développement. D'après l'étude de l'art effectuée en 2015 par J. Svenungsson et al. [16], plusieurs modèles ont été développés depuis le premier modèle de Ki et al. [48] en 2001. Ce modèle a été développé afin de simuler la formation du keyhole lors d'un soudage laser CO₂ en utilisant les équations de la mécanique du fluide en particulier les équations de Navier-Stokes.

4.4. Paramètres du soudage laser

Le soudage par faisceau laser dépend de nombreux paramètres, tant au niveau du procédé que des matériaux à assembler (**Figure I.4**). Par la suite quelques paramètres au niveau du procédé en particulier seront détaillés.

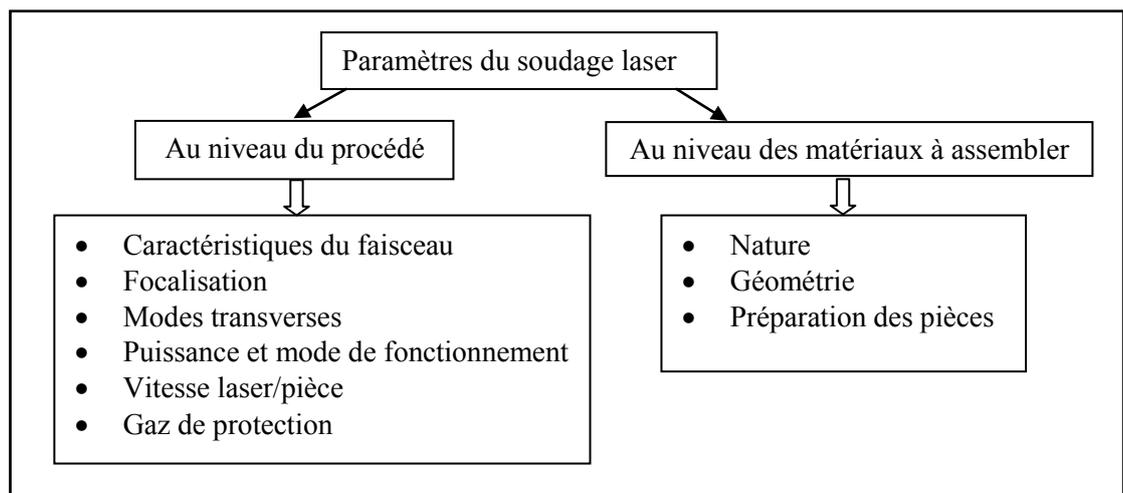


Figure I.4 : Paramètres du soudage par faisceau laser

4.4.1. Caractéristique du faisceau

Le rayonnement laser est monochromatique, il possède une seule longueur d'onde qui dépend de la nature du milieu émetteur. L'absorption du laser par un matériau varie selon la valeur de la longueur d'onde ; c'est pour cela certains matériaux progressent mieux avec un laser plutôt qu'avec un autre. La longueur d'onde des lasers industriels varie de 0.1 à 10.6 μm .

4.4.2. Focalisation

La focalisation du laser est un paramètre très important dans le procédé soudage laser. Un exemple sur l'influence de la distance entre le point focale et la plaque sur la largeur du cordon de soudure est présenté sur la **figure I.5**. C'est clair que le cordon s'élargie lorsque la distance entre le point focale et la plaque augmente. C'est le cas d'un soudage laser pour un alliage de magnésium AZ61 avec une puissance de 3 kW et une vitesse de 7200 mm/min [49]. Pour obtenir des meilleures performances, la position du point focal est généralement placée à l'intérieur du matériau [49].

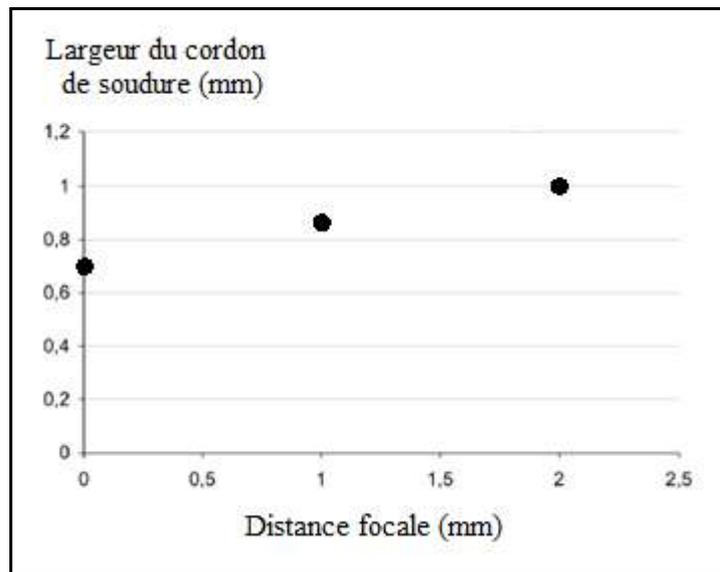


Figure I.5 : Influence de la distance entre le point focale et la plaque sur la largeur du cordon de soudure [49].

4.4.3. Puissance et vitesse

La puissance du laser et sa vitesse par rapport à la pièce sont deux données technologiques à régler suivant les matériaux à souder. Un domaine de soudabilité opérationnel du soudage peut être accompli. On peut trouver des exemples dans la littérature, dans le travail de L. Commin [49] pour les alliages de magnésium l'AZ31 et l'AZ61 et dans le travail de A. Salminen et al. [50] pour l'acier de construction S355.

Les figures **I.6** et **I.7** [51] montrent que la diminution de la vitesse de soudage avec une puissance constante produit une augmentation de la pénétration et de la largeur du cordon obtenu. C'est clair, suivant la **figure I.6**, que l'augmentation de la puissance avec une vitesse constante produit une augmentation de la pénétration en épaisseur [51].

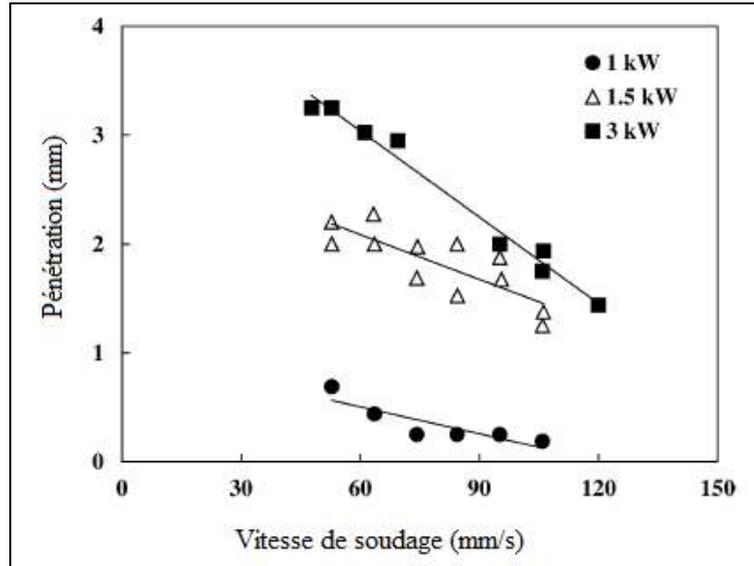


Figure I.6 : Effet de la vitesse de soudage sur la profondeur de pénétration des joints d'alliage de magnésium WE43 soudés par laser CO₂ [51]

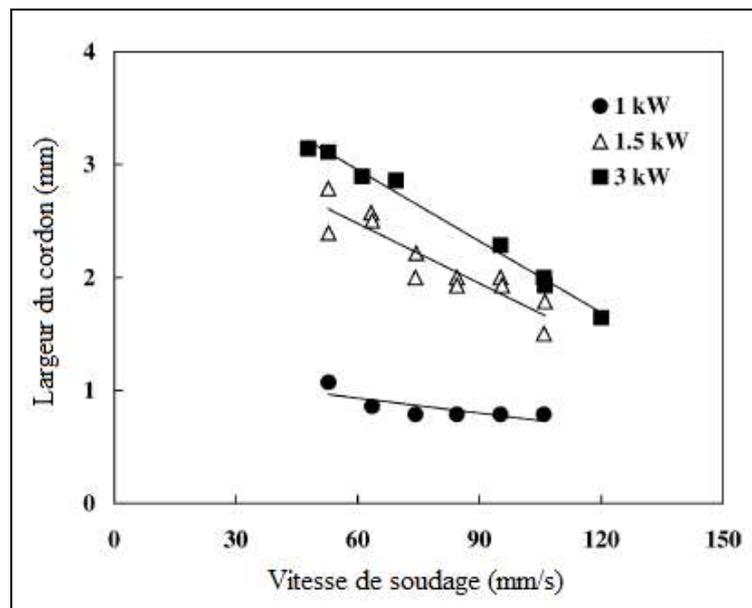


Figure I.7 : Effet de la vitesse de soudage sur la largeur de cordon des joints d'alliage de magnésium WE43 soudés par laser CO₂ [51].

4.4.4. Gaz de protection

En soudage laser, le gaz est utilisé pour trois raisons :

- La protection des composantes optiques : généralement avec un jet d'air propre, parallèle à la surface de la pièce à souder.
- La suppression du plasma : le plasma peut dévier et absorber le faisceau laser, un mélange de gaz constitué principalement de l'hélium est recommandé pour éviter la formation du plasma.

- L'amélioration de la qualité des joints : au niveau du contrôle de l'oxydation, des porosités, etc.

L'argon est le gaz de protection le plus usuel en soudage laser. C'est principalement à cause de :

- son efficacité pour éviter l'oxydation ;
- son coût abordable ;
- et sa densité qui est plus élevée que celle de l'air, ce qui assure une bonne couverture du bain de fusion.

De plus l'azote, à cause de son bas prix, peut être un bon choix dans certain cas. Enfin, on peut noter que pour de nombreuses applications aucun gaz de protection n'est utilisé parce que la réaction entre le bain de soudure et l'air ambiant étant limitée pendant une fraction de seconde sur une très petite surface.

5. Présentation des alliages du titane et du magnésium

Face à des besoins industriels, le développement des procédés de soudage des alliages légers est devenu un domaine de recherche intéressant, particulièrement à base de titane et de magnésium. En effet, les alliages de titane ainsi que les alliages de magnésium possèdent des caractéristiques intéressantes comme la faible densité, et la résistance à la corrosion ; c'est pour cela leur utilisation est de plus en plus conséquente dans des différents domaines [28, 52-54].

5.1. Présentation du titane et ses alliages

Le titane et ses alliages présentent, généralement, d'excellentes caractéristiques pour le soudage par fusion [55]. Néanmoins, le soudage laser représente un choix pratique pour le soudage du titane en raison de sa polyvalence, de son apport de chaleur spécifique élevé et de sa flexibilité [56]. Les propriétés du titane et ses alliages peuvent être séparées en deux catégories [57] :

- Suivant la nature de la surface (résistance à la corrosion, bonne souplesse...) : une utilisation croissante en particulier dans l'industrie chimique;
- Suivant les propriétés mécaniques (faible densité...) : les alliages de titane sont des matériaux de choix notamment dans l'aéronautique.

5.1.1. Propriétés générales du titane

En 1790, l'élément titane Ti a été découvert, cependant un démarrage de l'industrie de cet élément était vers 1950 ; Cela est dû à des difficultés au niveau

de sa métallurgie extractive. Les propriétés du titane sont très variées (voir **annexe 1**). Il faut non seulement retenir la résistance à la corrosion, mais aussi les excellentes propriétés mécaniques (résistance, flexibilité, fatigue, etc.) qui permettent de donner des pièces plus fines et légères. Ces propriétés expliquent le développement des applications dans les domaines aéronautique, aérospatial, chimique et médical [58, 59]. En outre, grâce à un meilleur rendement à la production, le titane est de plus en plus utilisé dans des applications courantes telles que l'industrie du sport ou de l'automobile.

À température ambiante et à pression atmosphérique, **Figure I.8**, la structure cristalline du titane pur est hexagonale compacte (HCP α) avec un rapport c/a de 1.587. À 882°C (1155 K), température de transus, le métal subit une transformation allotropique de la structure HCP vers la structure cubique centrée (CC β).

La phase β est stable jusqu'à la température de fusion égale à 1670°C (1943 K). La température à laquelle a lieu la transformation allotropique est appelée « transus β », $T_{\beta} = 1155$ K [60]. Par conséquent, les alliages de titane sont classés selon leurs structures favorisées (généralement α , β ou $\alpha - \beta$) dans les conditions ambiantes.

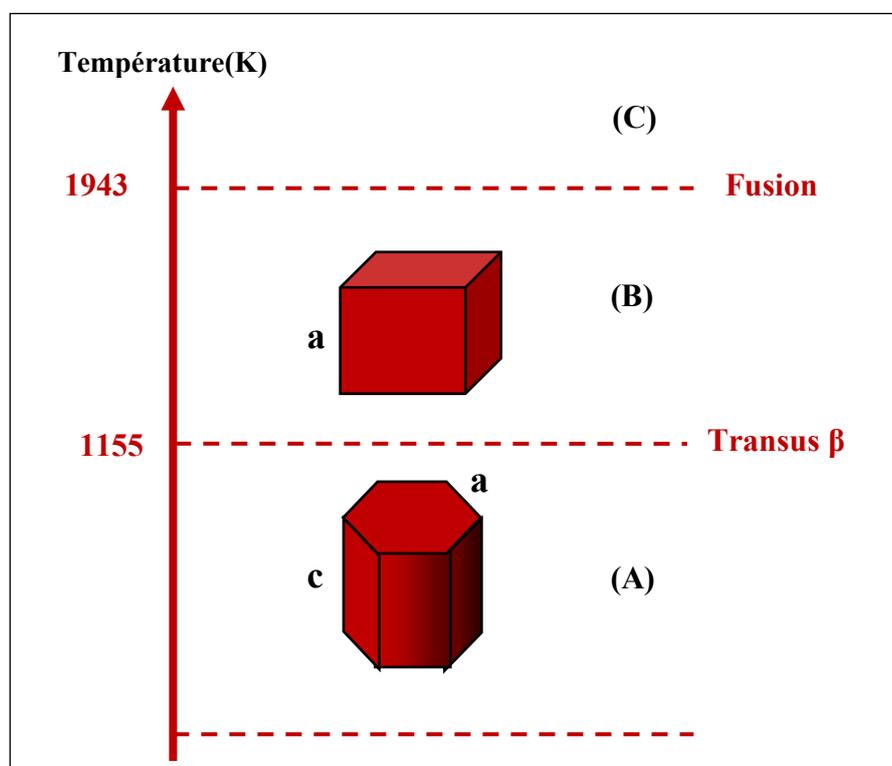


Figure I.8 : Structure cristallographique du titane non allié
 (A): Phase α HCP ($a=0.295$ nm, $c=0.4682$ nm),
 (B): Phase β CC ($a=0.332$ nm),
 (C): Etat liquide.

5.1.2. Propriétés générales de l'alliage de titane TA6V

Les alliages de titane présentent des propriétés et des applications intéressantes (**annexe 2**). Généralement les alliages de titane ont une densité de 40% moins que les aciers et une résistance exceptionnelle à la corrosion [17]. Le TA6V est un alliage de titane avec 6% en poids d'aluminium et 4% en poids de vanadium. Il est biphasé $\alpha+\beta$ avec un faible pourcentage (entre 6 et 8 %) de phase β à la température ambiante. La phase β est cubique centrée alors que la phase α est hexagonale pseudo compacte. Au cours du chauffage lent, il y a dissolution de la phase α , et la fraction de phase β augmente pour être égale à 1 aux températures supérieures à la température de transus T_β . Cette valeur de l'ordre de 980-1000°C (1253-1273 K), est fonction de la composition de l'alliage et est très sensible aux teneurs en éléments résiduels, notamment l'oxygène. Seule la phase β est présente pour des températures supérieures à T_β (**Figure I.9**). Elle est de structure cubique centrée de paramètre $a= 3.192 \text{ \AA}$. La température de fusion du TA6V est environ 1660°C et sa température d'ébullition se situe vers 3285°C [53]. Pour cet alliage, la fraction de phase α en présence à température ambiante est voisine de 95% massique [19].

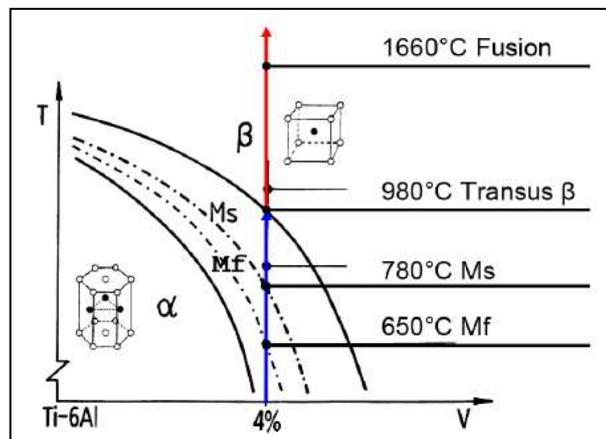


Figure I.9 : Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V [53]

Un gradient de température important est produit lors du soudage au laser, c'est pour cela les caractéristiques physiques du matériau doivent dépendre de la température. Boivineau et al. [52] ont étudié l'effet des températures jusqu'à 2700 K sur les propriétés physiques du TA6V tel que : la résistivité électrique, la capacité thermique, l'émissivité spectrale, la conductivité thermique et la diffusivité thermique. Cet effet a été aussi étudié et publié ailleurs dans la littérature [61, 62].

5.1.3. Utilisation de l'alliage TA6V

L'alliage de titane TA6V est largement utilisé dans des applications industrielles. C'est un alliage qui possède de bonnes propriétés mécaniques sous des températures élevées [52, 63]. C'est un matériau de choix dans les industries chimiques. Il est largement utilisé dans le domaine aéronautique et aérospatial [18], présentant un bon compromis entre résistance et flexibilité [19, 64].

5.2. Présentation du magnésium et ses alliages

5.2.1. Propriétés générales du magnésium

Le magnésium a été découvert par Humphry Davy (Angleterre) en 1808. Il se trouve aussi bien dans l'eau de mer que dans l'eau douce (2.5 % de la croûte terrestre). Les propriétés physiques du magnésium sont très intéressantes (voir **annexe 1**); sa masse volumique par exemple est très faible. Le magnésium possède une structure cristalline hexagonale compacte de paramètres de maille : $a = 0.3202$ nm, $c = 0.5199$ nm et de rapport $c/a = 1.62$.

5.2.2. Propriétés de l'alliage de magnésium

Les alliages de magnésium de la série AZ (voir **annexe 3**), en particulier l'alliage AZ91, ont été largement étudiés et utilisés pour certains composants structurels des automobiles, des avions et des ordinateurs [65]. D'une façon générale les alliages de magnésium utilisés pour les applications automobiles sont les alliages des séries AZ et AM. Ces alliages possèdent une excellente combinaison de propriétés mécaniques essentiellement la résistance à la corrosion et la moulabilité [65].

Les alliages du magnésium possèdent des caractéristiques spécifiques intéressantes comparées à celles des aciers et aux alliages d'aluminium. Le **tableau I.2** présente un exemple sur l'alliage AZ91 (alliage ternaire Mg-Al-Zn). On peut facilement noter la faible masse volumique et la bonne conductivité thermique de l'alliage de magnésium par rapport aux autres alliages.

Tableau I.2: Comparaison de la densité et de la conductivité thermique des alliages de magnésium par rapport à d'autres types d'alliage [66]

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Conductivité thermique à 20°C(W/m k)
Acier allié (45Ni Cr Mo 16)	7.81	33
Alliage d'aluminium (5080)	2.66	126
Alliage de magnésium (AZ91)	1.74	75

D'autre part les alliages de magnésium présentent quelques inconvénients comme la faible résistance à la corrosion dans les milieux agressifs et la faible résistance mécanique. Pourtant la plupart des alliages de magnésium ont une bonne soudabilité et possèdent d'autres propriétés intéressantes. Ils tendent à remplacer les aciers et les alliages d'aluminium dans plusieurs secteurs industriels.

5.2.3. Utilisation de l'alliage AM60

Les alliages de magnésium AM60 sont utilisés dans les boîtes des vitesses en industrie automobile [20, 67] ainsi que dans les boîtes de transmission des hélicoptères et dans certaines parties d'avions civils [21, 68]. Dans le domaine de l'électronique, beaucoup de produits comme les ordinateurs portables, les téléphones mobiles, les caméras et les caméscopes, sont actuellement fabriqués à partir des alliages de magnésium [22].

6. Phénomènes physiques au cours du soudage

Les phénomènes physiques contribuent de manière couplée et peuvent être d'origine thermique (apport de chaleur, conduction, rayonnement, convection), métallurgique (transformations métallurgiques, proportion des phases) et mécanique (déformations et contraintes). La relation entre ces phénomènes est présentée sur la **figure I.10**.

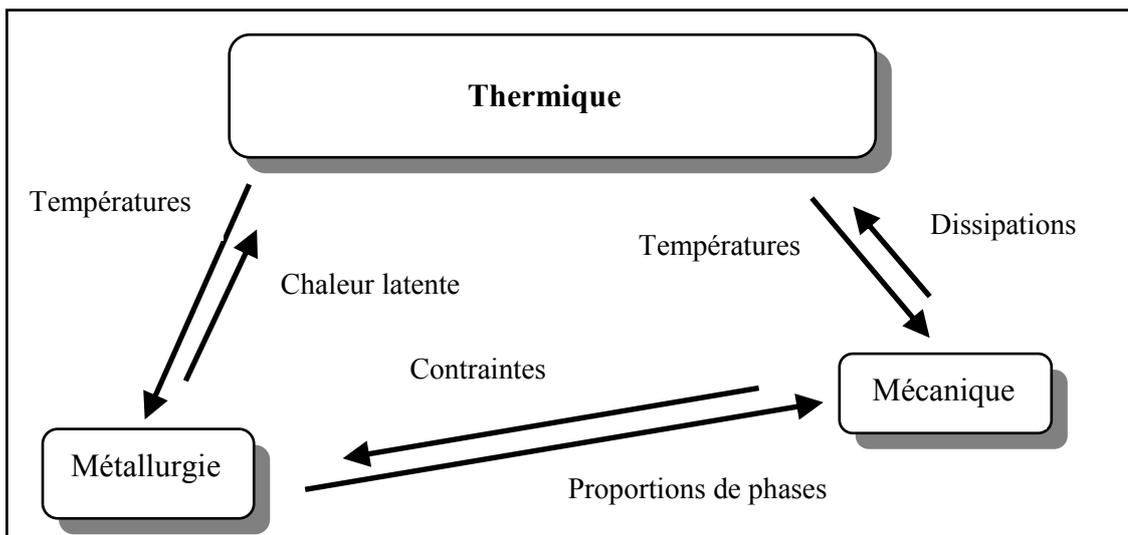


Figure I.10 : Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages

Les différents phénomènes à l'origine thermique qui peut être introduit au bilan énergétique sont illustrés sur la **figure I.11**.

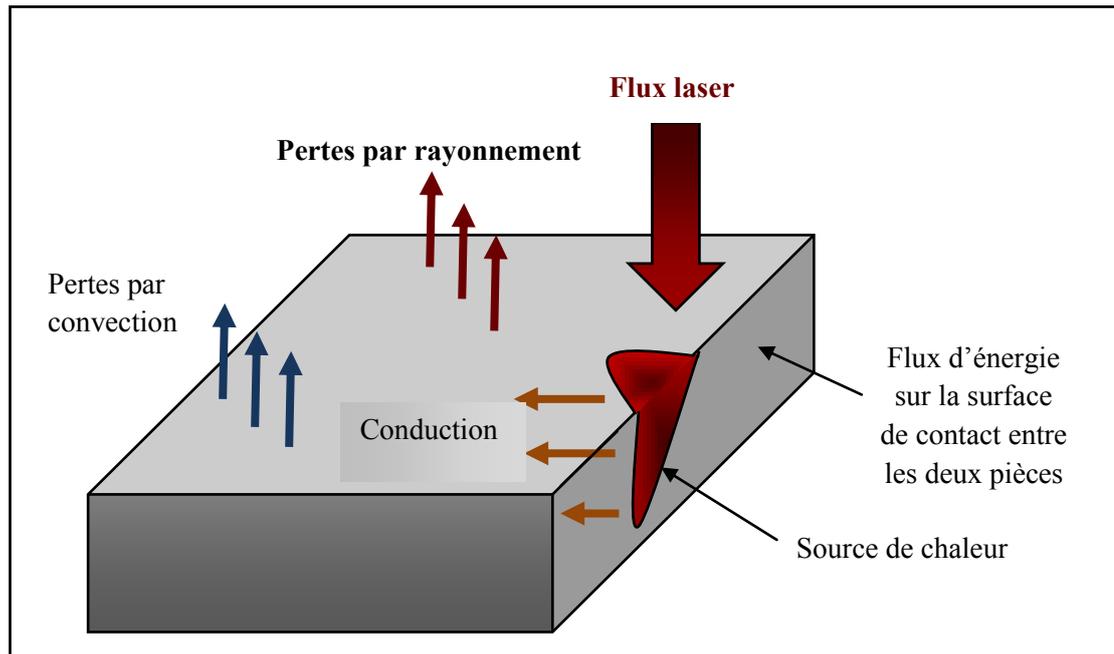


Figure I.11 : Modélisation du bilan énergétique au cours du soudage laser

7. Comportement thermique des plaques lors de soudage

Depuis plusieurs années, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour l'étude des différents phénomènes qui gouvernent les procédés de soudage. La modélisation numérique est un outil de prédiction du comportement des matériaux pour l'optimisation des procédés laser [36, 53, 66, 69-71]. Le comportement thermique est essentiellement gouverné par l'équation de conservation de l'énergie ou l'équation de chaleur. Cette équation s'écrit comme suit :

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T)\text{div}(\text{grad}T) + Q \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$\rho(T)$, $C(T)$ et $\lambda(T)$: Propriétés physiques en fonction de la température

Q : Terme source

7.1. Modèles des sources de chaleur

Il y a deux possibilités lors des procédés de soudage : soit les pièces qui se déplacent ou bien les sources. En général la source de chaleur se déplace par rapport à la pièce suivant la géométrie de la pièce. La source peut se déplacer suivant une translation à une vitesse constante si la pièce admet une géométrie cartésienne. Dans le cas du soudage des pièces cylindriques, la source se déplace à une vitesse angulaire constante.

Différents modèles décrivant la source de chaleur existent dans la littérature ; cependant, ces modèles proposent des simplifications dans la géométrie et la description des phénomènes impliqués. La différence d'échelle de la source (millimétrique) par rapport aux dimensions des plaques (quelques dizaines de centimètres) oblige les chercheurs à faire des hypothèses simplificatrices [35]. En plus, basé sur les observations métallurgiques issues des résultats expérimentaux, des simplifications peuvent être supposées.

Dans le travail de A. Belhadj et al. [28], la source a été considérée uniforme à volume cylindrique mobile. Avec une telle source, un modèle tridimensionnel a été développé pour simuler le comportement thermique d'alliages de magnésium lors du soudage laser. Ils ont trouvé que la zone fondue a la même largeur sur l'épaisseur sous les conditions utilisées. La source est considérée avec une répartition surfacique gaussienne dans les travaux de L-E Lingren et al. [72], K. Abderrazak et al. [73], Z. Gao [74], G. Tirand et al. [26] et M. Akbari et al. [75]. Un modèle mathématique volumique des sources de chaleur basé sur une distribution gaussienne de la densité de puissance dans l'espace est introduit par J. Goldak et al. [76, 77]. En particulier, une double géométrie ellipsoïdale est proposée afin que la taille et la forme de la source de chaleur puissent être facilement modifiées pour modéliser à la fois les procédés de soudage à pénétration peu profonde et les procédés à pénétration plus profonde. Dans le travail de Abderrazak et al. [24], la source utilisée est gaussienne et volumique afin d'étudier numériquement la formation de bain fusion lors du soudage laser continu de l'alliage de magnésium AZ91.

De nouveaux modèles sont établis et sont utilisés [78, 79] de sorte qu'il sera plus facile de choisir le modèle de source de chaleur approprié pour simuler le soudage par faisceau à haute énergie avec un rendement élevé.

7.2. Étude du bain de fusion

Une étude expérimentale du cordon de soudure Zn/Zn a été faite par M. Mostafa [80]. Les coupes macrographiques transverses obtenues d'un soudage laser Nd:YAG permettant de 2 kW de puissance et de vitesses de 10 et 30 mm/s, montrent que la profondeur du bain fondu diminue lorsque la vitesse augmente. Pour une faible vitesse (10 mm/s), l'effet des interfaces intervient sur la forme du bain fondu. La formation du capillaire a été aussi étudiée durant le soudage laser en développant

une simulation avec l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics. Cela a permis de simuler la forme de la zone fondue pour les couples Zn/Zn et Zn-quartz. Dans le travail de M. Courtois et al. [33], Un modèle thermo-hydraulique complet a été développé afin de décrire le comportement du bain de fusion lors d'un soudage laser. Dans le travail de E. Le Guen [44], un modèle numérique 3D quasi stationnaire a été développé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, permettant de calculer le champ de température au sein du métal afin de caractériser la géométrie du bain de fusion. Ce travail a été effectué avec le procédé de soudage hybride laser/MAG pour l'acier S355.

7.3. Évolution des températures sur les plaques

L'évolution des températures sur les plaques soudées par laser est l'objet de plusieurs travaux afin d'étudier le comportement thermique, et dans la majorité des travaux, le comportement mécanique et métallurgique.

Dans le travail de A. Belhadj [66] des essais d'assemblage d'échantillons en alliage de magnésium AM60 ont été effectués. Les conditions de soudage par faisceau laser CO₂ en mode continue utilisées sont : P= 3000 W et V=4.2 m/min. Un modèle numérique a été développé pour simuler le comportement thermique lors du soudage au laser de l'alliage AM60. Les températures mesurées expérimentalement dans ce travail sont comparées avec les résultats numériques.

Dans le travail de S. Bennour et al. [25], une étude numérique a été développée afin d'étudier l'impact des propriétés thermiques d'alliage de magnésium et de gaz de protection sur la formation du bain de soudure. Pour réaliser cette étude, une source de chaleur volumique gaussienne a été proposée pour modéliser la puissance du faisceau laser incident.

Un laser industriel Nd:YAG 2 kW a été utilisé dans le travail de N. Siva Shanmugam et al. [81] pour réaliser le soudage de l'acier inoxydable AISI 304. Dans ce travail, les propriétés physiques dépendent de la température ; ceci a une grande influence dans le calcul des profils de température sous les conditions utilisées. Une distribution gaussienne du flux thermique est supposée pour une source de chaleur mobile de forme conique.

M. Akbari et al. [75] ont présenté une étude numérique et expérimentale du soudage au laser de l'alliage de titane (TA6V) pour modéliser la distribution de la température afin de prédire la zone affectée thermiquement, la profondeur et la largeur du bain en fusion. Un des principaux résultats obtenus est qu'en diminuant la vitesse de soudage, la valeur maximale du profil de température augmente et sa valeur maximale apparue plus longtemps.

Dans le travail de J. Ahn et al. [82], des plaques de l'alliage TA6V ont été soudées à pleine pénétration afin de déterminer l'effet des paramètres de soudage, y compris la puissance laser, la vitesse de soudage et la position focale du faisceau sur la microstructure de soudure, le profil du cordon et la qualité de la soudure. Les puissances utilisées varient de $P = 2$ kW à 3.5 kW et les vitesses varient de $V = 1.8$ à 7.2 m/min.

Caiazza et al. [64] ont étudié expérimentalement le soudage laser CO₂ pour des alliages de titane. Les épaisseurs des plaques utilisées varient de 1 à 5 mm avec des puissances qui varient de $P = 0.8$ kW à 2.5 kW et des vitesses qui varient de $V = 50$ à 120 mm/s. Trois gaz de protection, He, Ar et N₂, ont été utilisés avec différentes buses de soudage pour déterminer quel est le gaz qui offre une bonne qualité du cordon sans défauts à la surface et aux parties internes. Parmi les principales conclusions de ce travail, l'épaisseur maximale qui pourrait être soudée avec un laser CO₂ de 2.5 kW est d'environ 5 mm. Ce qui confirme, d'après les auteurs [64], "une règle" qui dit : "*l'épaisseur maximale à souder est d'environ 1.5 à 2 fois la puissance maximale du laser*".

7.4. Vitesses de refroidissement des plaques

À partir de la température maximale atteinte durant le soudage, la vitesse de refroidissement sert à déterminer la structure métallurgique finale au niveau de la zone de fusion et la zone affectée thermiquement. Yung et al. [83] ont calculé les vitesses théoriques de refroidissement lors du soudage TIG des plaques minces en alliage de titane TA6V soit en dessous du point de fusion de l'alliage (1923 K). Les vitesses de refroidissement pour l'alliage de titane TA6V à une température de référence 1868 K sont données par la relation [83] :

$$v_R = 2\pi\lambda\rho C \left(\frac{e}{E}\right)^2 (T_r - T_0)^3 \quad (\text{I.4})$$

Avec :

λ : Conductivité thermique (J/mm s K)

ρ : Masse volumique (g/cm³)

C : Chaleur spécifique (J/g K)

e : Épaisseur des plaques (mm)

E : Énergie déposé (J/mm)

T_r : Température référence (1868 K)

T_0 : Température initiale (293 K)

Des études antérieures ont montré que le facteur clé qui régit les propriétés mécaniques et métallurgiques du cordon de soudure est sa morphologie. Les objectifs de plusieurs travaux étaient d'exploiter dans ce domaine. Un modèle a été développé et a été appliqué pour étudier la cinétique de transformation de la phase β au cours du refroidissement de l'alliage TA6V dans le travail de N. Kherrouba et al. [84]. Boccarusso et al. [18] ont examiné l'influence des caractéristiques géométriques des joints soudés sur leurs propriétés mécaniques. Dans ce travail, des tôles en alliage de titane TA6V de 3.2 mm d'épaisseur ont été soudées bout à bout à l'aide d'une source laser. A partir des chemins de refroidissement, K. Agrebi et al. [85] ont déterminé l'évolution des structures métallurgiques. Ils ont développé un code de calcul par éléments finis qui permet la prédiction du comportement thermo-métallurgique des plaques en acier au cours de soudage TIG des aciers.

7.5. Pertes d'énergie au niveau des plaques

Les pertes d'énergie au cours des processus de soudage peuvent être au niveau de l'équipement et au niveau des plaques. Au cours de soudage, l'énergie est transférée aux plaques métalliques par conduction. Une partie de cette énergie thermique est perdue par rayonnement, par convection et par évaporation du métal.

La perte d'énergie par rayonnement au niveau des plaques lors et après le soudage est donnée par la relation suivante [27, 86] :

$$W_{ray} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (L5)$$

Avec :

ε : l'émissivité

σ : la constante de Stefan–Boltzmann

La perte d'énergie par convection au niveau des plaques lors et après le soudage est donnée par la relation suivante [27, 86, 87] :

$$W_{conv} = h(T - T_0) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

h : le coefficient de convection ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

T_0 : Température initiale

Certains chercheurs [73, 86, 88] préfèrent utiliser une seule équation de perte d'énergie dans laquelle les effets du rayonnement et de la convection sont combinés dans un seul coefficient de transfert de chaleur. La relation est donnée par J. Goldak [77] :

$$W_{CR} = h_c(T - T_0) \quad (\text{I.7})$$

Avec : $h_c = 24.1 \times 10^{-4} \varepsilon T^{1.61}$

La vaporisation du métal présente une perte de matière et d'énergie. Elle est prise en considération par peu de chercheur [89]. Les hautes températures conduisent à la vaporisation de la surface qui forme certaines dépressions dans la pièce [90].

8. Comportement radiatif des plaques lors de soudage

8.1. Plasmas thermiques et équilibre thermodynamique

Les plasmas peuvent être classifiés selon le degré d'ionisation et/ou selon le degré de température. On distingue dans ce dernier cas trois sortes de plasmas [91]: plasmas froids, plasmas chauds et plasmas thermiques. Les plasmas froids sont constitués principalement de neutres, et les électrons sont responsables de nombreuses réactions. Les ions et les neutres restent à des températures inférieures à 10^3 K , tandis que les électrons sont à des températures relativement élevées mais elles restent toujours faibles. Les plasmas chauds ont des températures supérieures à 10^6 K . Les plasmas thermiques sont caractérisés par des températures supérieures à 3000 K . Ils se produisent dans la nature lorsque les corps entrent dans l'atmosphère (astéroïde...) et ils se produisent artificiellement dans les plasmas d'arc. Les plasmas thermiques offrent des avantages dans les traitements des matériaux.

Les phénomènes microscopiques possibles dans un plasma (excitations, dissociation, ionisation, recombinaison...) gouvernent les populations de différentes

espèces (neutres, ions, électrons et photons). On peut parler d'un état d'équilibre thermodynamique complet (ETC) dans un plasma lorsque chaque processus (collisionnel ou radiatif) est équilibré par son inverse. La température et la densité (ou la pression) sont deux paramètres macroscopiques qui peuvent déterminer cet état, et elles y sont uniformes. Dans ce cas le rayonnement est isotrope, homogène et entièrement emprisonné dans le plasma (corps noir, plasma optiquement épais). Cette situation existe au cœur des étoiles.

Les plasmas de laboratoire ont une faible densité et un petit volume, ils constituent des milieux optiquement minces parce que les photons émis ne sont réabsorbés par la matière, et le rayonnement s'échappe. Ces plasmas présentent un gradient de température et de densité et le rayonnement émis est un ensemble de raies. Dans ce cas un équilibre thermodynamique local (ETL) est introduit. Le système est remplacé par un ensemble de sous systèmes où la micro réversibilité des transitions radiatives et collisionnelles est garantie.

D'une façon générale, on distingue deux principaux types de plasmas, à basse pression et à pression atmosphérique. Pour les plasmas à basse pression, les libres parcours moyens sont longs alors les collisions entre les particules sont moins fréquents. Dans ces conditions, la température électronique T_e est beaucoup plus élevée que les températures des particules lourdes T_h . Par contre, dans les plasmas à pression atmosphérique, les libres parcours moyens sont plus courts alors le plasma est dominé par les collisions. Dans le cas des plasmas thermiques à pression atmosphérique, l'équilibre thermodynamique local existe $T_e = T_h$ [92].

8.2. Phénomènes radiatifs dans les plasmas thermiques

Dans un plasma, les transferts d'énergie au niveau des électrons donnent lieu à des phénomènes radiatifs. Une transition électronique entre deux orbitales d'un atome donne une raie du spectre. C'est le cas d'une transition lié-lié. Dans le cas du rayonnement thermique ou le fond continu du rayonnement, l'énergie présente un continuum de rayonnement qui est distribué sur une large zone du spectre. Généralement, le rayonnement thermique est considéré comme un phénomène de volume. Toutefois, pour les solides opaques tels que les métaux, le rayonnement est considéré comme un phénomène de surface, car le rayonnement émis par la région intérieure n'atteint jamais la surface [93].

Le rayonnement d'un plasma lors du soudage présente un spectre d'émission qui dépend, en particulier, du gaz de protection et de la nature du métal qui s'évapore. Des mesures des températures, autant que méthodes pratique et sans contact, ont été largement utilisées dans les procédés de soudage. L'intensité du rayonnement thermique est liée à la température de la surface émettrice [30]. On peut trouver des exemples sur des images prises à l'aide d'un capteur optique et une caméra infrarouge lors de soudage à l'arc et au plasma dans les travaux de G. Zhang et al. [94]. Ces images permettent, selon ce travail, de contrôler la dynamique de la source. Pour plus de détails sur l'imagerie thermique, il est conseillé de consulter le **chapitre 1** de la thèse de doctorat réalisé par Y. Rotrou [95] en 2006. Voir aussi le travail de A. Mathieu et al. [30] qui ont présenté une méthode de mesure de la température en surface d'un bain de soudage à l'arc TIG.

Dans le cas des métaux fusionnés, la surface est supposée avoir un comportement similaire à celui d'un émetteur. Dans ce cas le rayonnement obéit aux lois du rayonnement d'un corps noir.

8.3. Lois du rayonnement thermique

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement. Plus la température du corps est élevée, plus l'agitation thermique responsable de l'émission est élevée. Le rayonnement thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre qui présente une répartition de l'énergie suivant la longueur d'onde.

8.3.1. Loi de Planck

Le rayonnement thermique émis par une cavité fermée appelée corps noir a été étudié par Planck. En 1901, il a établi la loi de Planck, qui décrit la distribution spectrale d'un corps noir de température T , qui présente la densité maximale émise par un corps réel. Cette loi est l'équation fondamentale du rayonnement ; elle s'écrit comme suit [96]:

$$L_{\omega}^0(T) = \frac{2\hbar\omega^3}{c^2} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)} - 1 \right) \quad (1.8)$$

$L_{\omega}^0(T)$: est la luminance spectrale du corps noir. C'est une puissance rayonnée par unité d'angle solide, de surface apparente et spectrale. Cette grandeur est en $W/m^2 sr s$.

Écrite en fonction de la longueur d'onde, la fonction de Planck prend la forme :

$$L_{\lambda}^0(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T}\right)} - 1 \right) \quad (\text{I.9})$$

Avec :

h : constante de Planck, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s

k_B : constante de Boltzmann, $k_B = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K

8.3.2. Loi de Wien

La fonction de Planck, passe par un maximum, à une température T , Elle vérifie la loi de Wien [95]:

$$\lambda_{O_{\max}} = \frac{2898}{T(\text{K})} \mu\text{m} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$\lambda_{O_{\max}}$: Longueur d'onde appropriée à l'émission maximale ;

T : Température absolue du corps en Kelvin.

La position $\lambda_{O_{\max}}$ du maximum de cette courbe dépend de la température T ; elle est de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ à 300 K. C'est clair que le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente.

Lorsque la luminance est exprimée par unité de fréquence la position du maximum ω_{\max} est donnée par la relation :

$$\omega_{\max}(\text{THz}) = 0.3694 T(\text{K}) \quad (\text{I.11})$$

8.3.3. Loi de Stefan-Boltzmann

L'émittance totale est donnée par la relation [96] :

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (\text{I.12})$$

C'est la loi de Stefan-Boltzmann où σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴.

8.4. Rayonnement émis lors des soudages

Dans la suite, quelques travaux sur l'utilisation des rayonnements émis lors des soudages seront présentés. M. Sassi et al. [97] ont étudié la possibilité d'utiliser les raies du cuivre comme élément traceur dans les torches à plasma industrielles (2 MW). Il permet de mesurer les températures dans la gamme 2500-25000 K. Le domaine de longueur d'onde est 508-526 nm. Le spectre émis pendant le soudage au laser CO₂ d'un alliage d'aluminium 6013 a été détectée avec un système CCD dans le travail de S. Palanco et al. [98]. Le spectre de raies observé est sur la plage

de 248.60-290.95 nm. Le travail de J. Mirapeix et al. [99] présente une technique d'analyse par spectroscopie de plasma du soudage à l'arc ; les spectres détectés sont ceux de L'Ar I, Ar II et Cr I et ils sont situés sur l'intervalle de 320 à 520 nm. Les températures électroniques du plasma sont de l'ordre de 10^4 K. L'influence des paramètres de soudage TIG sur l'intensité spectrale de l'arc de soudage dans la plage de 340 à 860 nm a été étudié est présenté par M. S. Węglowski et al. [100]. Le spectre de raies été sur le domaine de longueurs d'onde comprises entre 340 et 860 nm. Z. Zhang et al. [101] ont effectué une série de mesures de spectroscopie d'émission de plasma pour le soudage TIG pour le magnésium et les raies détectées sont observées sur la plage de 380-560 nm.

Afin d'étudier le rayonnement émis par les plasmas dans les torches à plasmas pour la sidérurgie, un modèle numérique pour le calcul des profils pour les raies de l'argon et l'hydrogène a été proposé [102]. La conclusion principale obtenu est qu'il faut utiliser la méthode de l'inversion d'Abel dans le cas des raies de l'Ar I (696.54 nm et 706.72 nm), tandis que dans le cas des raies de l'hydrogène (3p-2s) 656.272nm et (3d-2p) 656.285 nm ce n'est pas indispensable.

Les transitions radiatives du magnésium neutre Mg I et ionisé Mg II durant l'opération de soudage étaient le sujet de travail de master de Y. Bennana en 2015 [103]. Les niveaux énergétiques considérés sont : $2p^63p$ ($^2P^0_{1/2}$) et $2p^63d$ ($^2D_{3/2}$). Les élargissements Doppler, les profils de raies, les diagrammes de Boltzmann et les rapports d'intensités ont été calculés suivant plusieurs valeurs de température.

Le travail de master R. Bekhouche en 2016 [104] traite l'élargissement Stark électroniques des raies spectrales dans les plasmas lors de la soudure au laser de plaques d'alliages métalliques. Les différents modèles théoriques pour le calcul d'élargissement électronique ont été étudiés. Une expression qui dépend de la densité électronique et de la température a été utilisée pour le calcul des spectres et des élargissements électroniques des raies (5172.68 Å, 5183.6043 Å) de Mg I et (2795.528 Å, 2802.705 Å) de Mg II. Les températures varient de 300 à 6500 K et les densités électroniques varient de 10^{16} à 10^{17} cm⁻³.

Nous avons choisis, à titre d'exemple, quelques valeurs de températures appropriées au soudage de l'alliage de titane TA6V pour calculer λ_m suivant la loi de Wien. Les résultats sont présentés sur le **tableau I.3**.

Tableau I.3 : Températures et λ_{Omax} suivant la loi de Wien

$T(K)$	$\lambda_{Omax}(nm)$
1000	2898
2000	1449

Généralement, on parle de rayonnement thermique lorsque la longueur d'onde d'émission est comprise entre 0.1 et 100 μm , principalement dans le domaine infrarouge et le visible (**Figure I.12**). D'une part, on note que le rayonnement thermique n'occupe donc qu'une faible partie du spectre électromagnétique. D'une autre part, il est bien clair que les spectres des raies discutées ci-dessus se situent loin du rayonnement thermique.

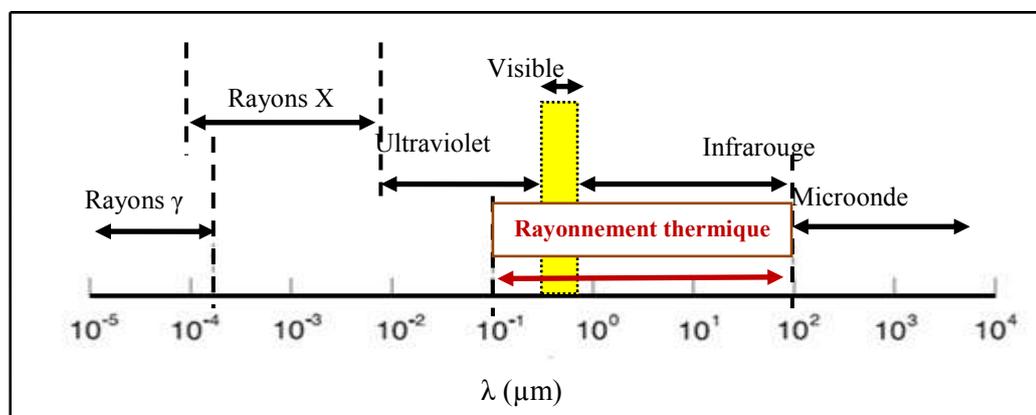


Figure I.12 : Domaine du rayonnement thermique dans le spectre électromagnétique

9. Conclusion

Ce premier chapitre correspond à un accès relatif au thème du spectre d'émission du rayonnement thermique lors des soudures de plaques métalliques par les lasers.

Au cours des procédés de soudage, la détermination du comportement thermique des plaques à souder peut être réalisée à partir de la résolution de l'équation de conservation de l'énergie ou l'équation de chaleur. C'est une équation aux dérivées partielles (EDP) qui peut être résolue par plusieurs méthodes numériques. Les profils de température des pièces peuvent être déterminés en fonction de position et de temps. Les propriétés thermo-physiques (masse volumique, conductivité thermique, chaleur spécifique, enthalpies de transformation de phases) doivent être connues en fonction de la température pour chaque matériau utilisé.

La modélisation numérique du rayonnement émis consiste en une formulation du rayonnement émis à partir des propriétés du milieu. L'intensité du rayonnement thermique est liée à la température de la surface émettrice.

Dans cette thèse, le calcul des pertes par rayonnement et par convection et la détermination du rayonnement émis lors des soudures des métaux présentent un objectif principal. Pour cela, il est nécessaire de construire un modèle numérique qui doit prendre en compte les gradients de températures élevées à proximité des cordons de soudures.

CHAPITRE 2

Modélisation du comportement thermique lors du soudage

« L'homme étudie pour connaître, le petit homme pour être connu. »

[Proverbe turc]

Chapitre 2 :

Modélisation du comportement thermique lors du soudage

1. Introduction

Les méthodes utilisées pour l'analyse des problèmes physiques sont les méthodes analytiques, expérimentales et numériques. Pour le soudage et essentiellement le soudage laser, c'est important de développer et d'utiliser des techniques numériques afin de simuler les conséquences thermiques car les investigations expérimentales peuvent être difficiles, peu pratiques et coûteuses.

Plusieurs travaux concernant l'étude numérique des phénomènes reliés aux procédés de soudage des métaux font partie du domaine d'intérêt de l'équipe de recherche : Plasma d'Arc (étude des plasmas lors de l'interaction plasma-surface ; chef d'équipe : Prof. F. Khelifaoui) du laboratoire de recherche Laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS) à l'Université Kasdi Merbah Ouargla.

Dans le but de modéliser le comportement thermique au cours du soudage des métaux par faisceau laser, les différents phénomènes qui peuvent être impliqués dans l'opération ont été présentés [105]. Dans le travail de S. Guerrida [106, 107], une première mise en équation a été faite pour le traitement de l'opération de soudage par laser CO₂ en mode continu sur des plaques de l'alliage de magnésium. Un traitement de changement de phase a été introduit dans le travail de K. Thlib [108, 109]; un laser CO₂ fixe et mobile a été utilisé pour l'étude de soudage de deux plaques identiques d'alliage de titane TA6V. La distribution de température et les pertes d'énergie par rayonnement et convection ont été déterminées dans le travail de S. Khemgani [110, 111]. Dans ce dernier travail la source a été supposée ponctuelle et la température a été supposée constante dans le traitement de changement de phase solide/liquide. Un autre travail a été effectué dans le mémoire de F. Hathat en 2017 [112] sur l'étude des vitesses du gaz de protection dans les dispositifs de soudage au laser. Dans le travail

de N. Guessoum et F. Benatallah [113], les vitesses des gaz de protection issu d'un tube incliné sont calculées lors de soudage. Une étude sur les répartitions des sources lasers a été effectuée par S. Benchaa [114] en utilisant une source volumique. D'autres travaux concernant l'étude du spectre émis lors du soudage ont été effectués au sein du laboratoire LRPPS [115].

La modélisation du comportement thermique repose sur la modélisation des phénomènes mis en jeu au cours de soudage. Dans le but de mieux comprendre, simuler et quantifier quelques phénomènes impliqués aux procédés de soudage, il faut avoir une idée générale de ce processus pour mieux les modéliser.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les modèles utilisés. L'étude numérique développée pour calculer les rayonnements émis par des plaques métalliques lors d'un soudage sera présentés. La modélisation repose dans un premier temps sur l'analyse du comportement thermique des plaques. Pour cela, nous proposons de développer une modélisation temporelle et spatiale à 2D et une autre temporelle et spatiale à 3D. Un certain nombre d'hypothèses que nous allons exposer dans ce chapitre qui nous permet d'approcher numériquement de l'évolution thermique durant le soudage. Une comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux des travaux antérieurs, qui seront présentés dans le **chapitre III** concernant l'évolution de la température en fonction du temps, assurera la validation des modèles proposés.

Les équations de conservation et les méthodes numériques utilisées pour la résolution sont présentées au début de ce chapitre ainsi que les propriétés des alliages utilisés dans ce travail. Nous présentons ensuite les modélisations mathématiques et numériques de la source de l'énergie et du phénomène pour les deux cas 2D et 3D. Ces modèles sont capables de prédire les comportements thermiques pour les deux cas dans toute la plaque près et loin du cordon de soudure. Ces modélisations auront pour objectif de déterminer les pertes d'énergie par rayonnement et par convection durant le soudage et après refroidissement des pièces soudées. L'étude sera localisée sur le soudage laser en particulier, pourtant elle peut être valable pour le soudage torche à plasma.

2. Equation de conservation de l'énergie

2.1. Lois de conservation

Les équations de conservations qui traduisent les lois de conservation en mécanique sont des Equations aux Dérivées Partielles (EDP). Ces équations fondamentales permettent de décrire différents problèmes de la physique. Ces équations sont :

- l'équation de conservation de masse ;
- l'équation de conservation de quantité de mouvement ;
- l'équation de conservation de l'énergie.

Les équations de conservation possèdent une forme intégrale générale présentée dans la relation suivante [116] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_D (\rho\Phi) dv + \iiint_D \text{div}\vec{J} = \iiint_D S dv \quad (\text{II.1})$$

La forme générale des lois de conservation est [116] :

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\Phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\Phi) + S \quad (\text{II.2})$$

Les variables Φ , Γ et S pour les différentes équations de conservation sont présentées dans le **tableau II.1**.

Tableau II.1 : Les variables Φ , Γ et S pour les équations de conservation [116]

Equation de conservation	Φ	Γ	S
Masse	1	-	-
Quantité de mouvement	\vec{u} (vitesse)	m	<ul style="list-style-type: none"> – Forces de volume – Gradient de pression – Complément des forces visqueuses
Energie	E (énergie) H (enthalpie) T (température)	λ/C	<ul style="list-style-type: none"> – Sources de l'énergie volumique – Dissipation visqueuse – Variations de puissance

2.2. Équation de l'énergie

L'équation de l'énergie exprime la conservation d'énergie. Elle est valable pour les milieux continus (le cas solide, liquide, gaz). Elle s'applique pour le matériau à souder comme pour les gaz de protection.

Trois formes d'équation issues de l'équation **(II.2)** appliquées pour l'équation de conservation de l'énergie peuvent apparaître dans la littérature pour la modélisation des procédés de soudage comme l'indique le **tableau II.1**. L'équation de l'énergie peut être en fonction de l'enthalpie H [12, 117, 118] ou encore en fonction de la température T [66, 79, 119]. Dans notre travail, nous avons choisi d'utiliser l'équation de l'énergie en fonction de la température.

3. Propriétés des matériaux

Un important gradient de température se produit du début à la fin du soudage laser, de sorte que le matériau peut passer du solide au liquide. Puisque les caractéristiques des métaux dépendent de la température, nous avons supposé que chaque phase possède une conductivité thermique, une densité, une chaleur spécifique et une émissivité moyennes différentes.

3.1. Propriétés de l'alliage de titane TA6V

Comme il est indiqué dans la section **5.1.3** du **chapitre I**, l'alliage de titane TA6V est largement utilisé dans des applications industrielles pour ses excellentes propriétés. La gamme de température β -transus de TA6V est $T_\beta \approx 1253\text{--}1268$ K [82], ce qui est important pour déterminer la structure TA6V. La fusion de l'alliage TA6V s'effectue sur une gamme de température 1913 K à 1933 K. Par conséquent, une température moyenne de $T_f = 1923$ K est considérée comme point de fusion, cette valeur a été utilisée par de nombreux auteurs [61, 62, 75].

Lors du soudage laser, un important gradient de température se produit et les propriétés physiques du matériau (densité, chaleur spécifique, conductivité...) doivent dépendre de la température. M. Boivineau et al. [52] ont étudié l'effet de la température de soudage sur les propriétés physiques du TA6V solide et liquide, qui ont été publiés ailleurs dans la littérature [61, 62]. La densité de l'alliage de TA6V, suivant K. C. Mills [62], peut prendre les expressions suivantes :

$$\text{– Pour l'état solide : } \rho(\text{kg/m}^3) = 4420 - 0.154[T(^{\circ}\text{C}) - 25] \quad \text{(II.3)}$$

$$\text{– Pour l'état liquide : } \rho(\text{kg/m}^3) = 3920 - 0.68[T(^{\circ}\text{C}) - 1650] \quad \text{(II.4)}$$

La **figure II.1** présente la densité de l'alliage TA6V en fonction de la température calculée à partir des relations **(II.3)** et **(II.4)**. Les valeurs sont calculées avec des précisions qui ne dépassent pas 10 %.

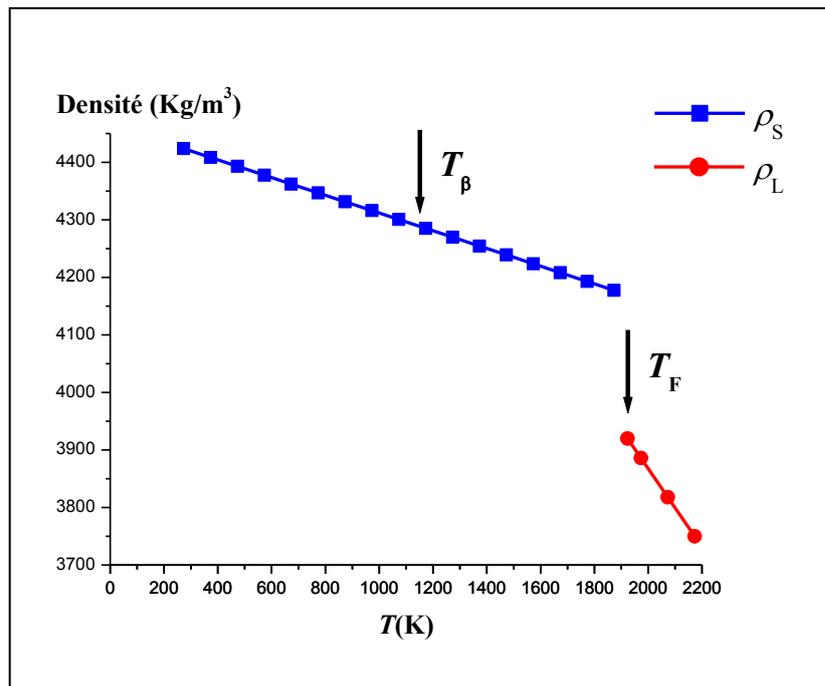


Figure II.1 : Densité de l'alliage TA6V en fonction de la température calculée suivant les relations de K. C. Mills [62]

La chaleur spécifique et la conductivité thermique, données par K. C. Mills [62] et M. Boivineau et al. [52], sont présentés sur le **tableau II.2**.

Tableau II.2 : Chaleur spécifique et conductivité thermique de l'alliage de titane en fonction de la température

Température (K)	Chaleur spécifique (J/K kg)		Conductivité thermique (W/mK)	
	K. C. Mills [62]	M. Boivineau et al. [52]	K. C. Mills [62]	M. Boivineau et al. [52]
373	562	/	7.5	/
875	673	650	14.2	12.0
1273	650	750	19.3	17.2
1473	678	1090	22.9	21.4
1923	830	/	27.5	28.0
2073	830	/	34.6	31.7
2173	830	/	/	32.7

La **figure II.2** présente les valeurs de l'émissivité de l'alliage de titane TA6V pour différentes températures mesurées et calculées par plusieurs auteurs [25, 62, 120].

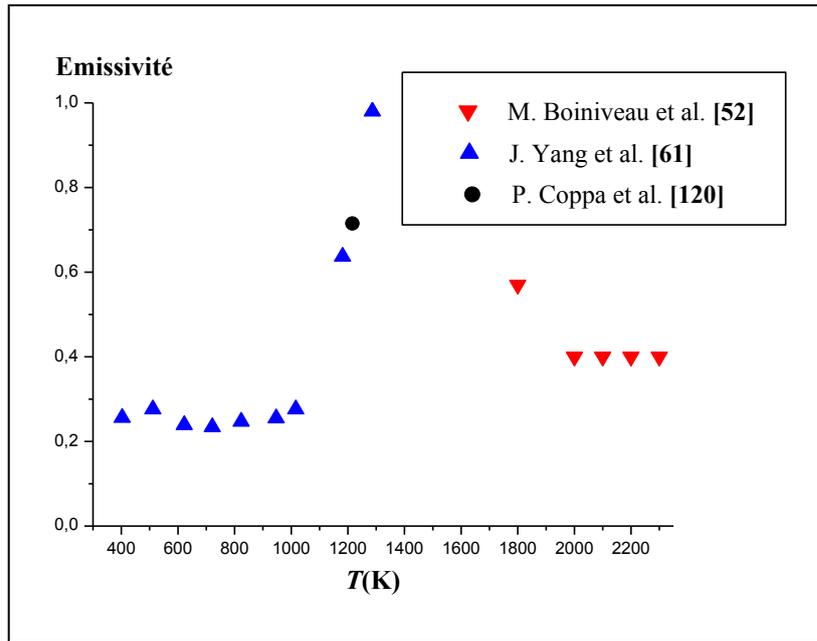


Figure II.2 : Valeurs de l'émissivité de l'alliage de titane TA6V pour différentes températures

Les propriétés physiques de l'alliage TA6V utilisées dans ce travail sont présentées dans le **tableau II.3**; nous avons exploité ces valeurs et d'autres. Le coefficient de transfert thermique, $h = 50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ [61], est supposé indépendant de la température.

Tableau II.3 : Propriétés physiques de l'alliage TA6V en fonction de l'état de matière

Propriétés	Solide	Solide / Liquide	Liquide
$\rho(\text{kg/m}^3)$	4300	4100	3850
$C(\text{J/kg K})$	610	770	830
$\lambda(\text{W/m K})$	15	27.5	35
ε	0.25	0.40	0.40

Pour la modélisation du soudage, il est nécessaire de déterminer l'énergie du laser utilisée dans le soudage. Pour savoir quelle proportion est absorbée lors de l'interaction. L'énergie absorbée du laser dépend de la nature du matériau, de la longueur d'onde du faisceau laser, de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la géométrie de l'interface. Le coefficient d'absorption utilisé est $\eta = 0.34$ [61].

3.2. Propriétés de l'alliage de magnésium AM60

Comme il est indiqué dans la section 5.2.3 du **chapitre I**, l'alliage de magnésium AM60 est aussi largement utilisé dans des applications industrielles. Il présente beaucoup d'avantages et quelques inconvénients. Le point de fusion de l'alliage AM60

est $T_f = 889$ K. Les propriétés physiques de l'alliage AM60 sont présentées sur le **tableau II.4** en fonction de la température. Ces valeurs sont celles utilisées par A. Belhadj [66].

Tableau II.4 : Propriétés physiques de l'alliage AM60 en fonction de la température [66]

Température (K)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C(\text{J/kg K})$	$\lambda(\text{W/m K})$
293	1790	1010	63
473	1766	1080	85
623	1755	1155	90
873	1730	1300	72
973	1715	1380	60

Le **tableau II.5** présente les propriétés physiques de l'alliage AM60 utilisées dans ce travail. Le coefficient de transfert thermique, $h = 5$ W/m²K [66], est supposé indépendant de la température. La valeur de l'émissivité est $\varepsilon = 0.2$ [121].

Tableau II.5 : Propriétés physiques de l'alliage AM60 en fonction de l'état de la matière

	Solide	Solide / Liquide	Liquide
$\rho(\text{kg/ m}^3)$	1760	1720	1710
$C(\text{J/kg K})$	1080	1350	1400
$\lambda(\text{W/m K})$	80	72	60

4. Modélisation mathématique et numérique cas 2D

Le modèle géométrique sera simplifié à un maillage bidimensionnel basant sur les critères suivants :

- L'utilisation des plaques minces (petites épaisseur devant les autres dimensions) ;
- Dans le cas de soudage au laser des plaques minces, essentiellement lors de l'utilisation du mode keyhole la zone fondue a la même largeur sur toute l'épaisseur [66].

Cela nous a permis d'adopter l'hypothèse de considérer que les propriétés peuvent être uniformes en profondeur. Par conséquent, sous les conditions de soudage utilisées dans cette étude, nous avons supposé que les températures de soudage sont identiques à toutes les profondeurs de pénétration. Pour simplifier, nous avons supposé que l'énergie perdue à la surface par rayonnement et par convection peut être traitée par un modèle bidimensionnel sans perte de généralité.

4.1. Source d'énergie

Pour un laser de vitesse V et de rayon R , une distribution surfacique gaussienne (**Figure II.3**) a été utilisée et elle est exprimée comme suit [122]:

$$Q_{(r,t)} = \begin{cases} Q_0 \exp\left(\frac{-r^2(t)}{R^2}\right) & r \leq 2R \\ 0 & r > 2R \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec : $r^2(t) = x^2 + (y - Vt)^2$

On note que Q_0 est choisi pour avoir la puissance totale absorbée du laser P . De sorte que ($P = \eta P_i$). P_i est la puissance incidente et η est coefficient d'absorption du matériau de la pièce. La densité de puissance suivant la relation (II.5) est :

- Pour $r=R$: $Q(R,t) = \exp(-1)Q_0 = 0.37Q_0$
- Pour $r=2R$: $Q(2R,t) = \exp(-4)Q_0 = 0.02Q_0$

On peut constater que la distribution de l'énergie est pratiquement autour de R .

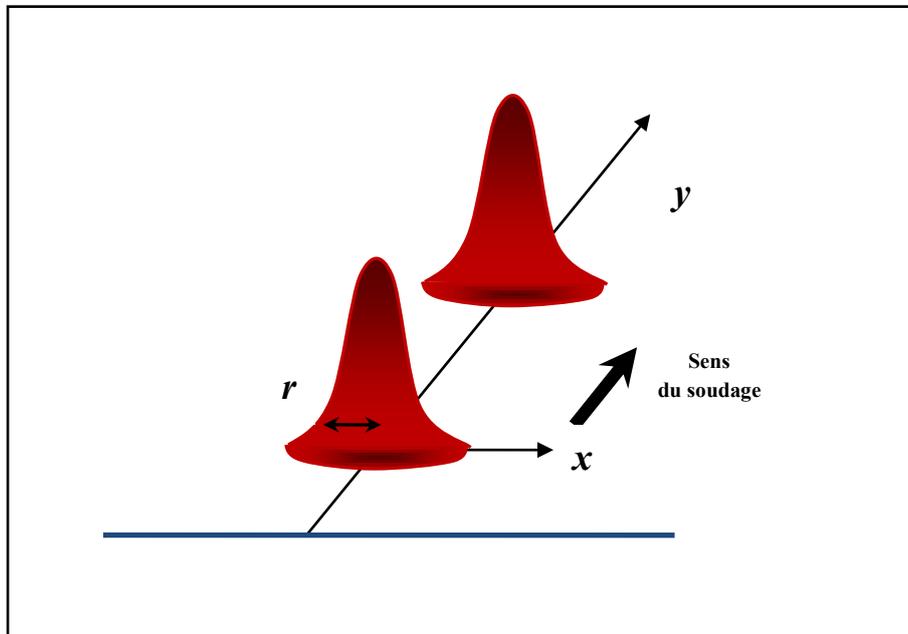


Figure II.3 : Source surfacique gaussienne

4.2. Hypothèses et équations gouvernantes

La configuration géométrique du problème et le système de coordonnées cartésien correspondant sont illustrés sur la **figure II.4**. La formulation mathématique du modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- (1) la température initiale de la pièce est $T_0 = 300$ K ;
- (2) le faisceau se déplace, par rapport à la pièce, à une vitesse constante V ;
- (3) la source de l'énergie se déplace en translation rectiligne suivant l'axe y ;
- (4) un contact parfait entre les deux pièces identiques à souder ;
- (5) l'analyse thermique n'a été effectuée que sur la moitié de l'assemblage ($x \geq 0$);
- (6) les effets énergétiques dus au changement d'états physique (liquide ↔ solide) sont pris en considération ;
- (7) l'énergie est supposée être perdue seulement par rayonnement et par convection.

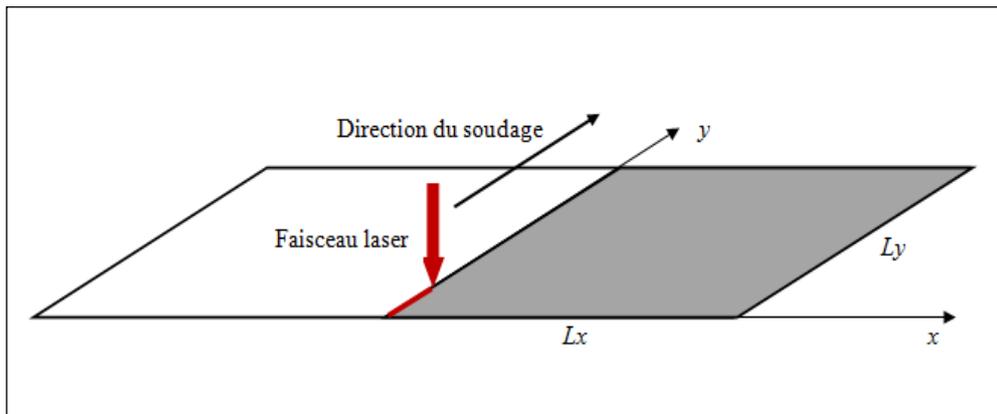


Figure II.4 : Présentation du problème 2D

La résolution de l'équation de l'énergie, donnée par l'équation (II.6), permet de calculer les valeurs de la température en tout point de la pièce et à chaque instant du soudage.

$$\rho_{(i)} C_{(i)} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{(i)} \text{div}(\text{grad}T) + Q - W \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\rho_{(i)}$, $C_{(i)}$ et $\lambda_{(i)}$: Propriétés physiques en fonction de phase (solide et liquide)

W : Énergie perdue

La distribution de la chaleur dans la phase solide obéit à l'équation suivante [122]:

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_{(x,y,t)}}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_{(x,y,t)} + Q_{(x,y,t)} - \sigma \varepsilon_s (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_0) \quad (\text{II.7})$$

La distribution de la chaleur dans la phase liquide obéit à l'équation suivante [122] :

$$\rho_l C_l \frac{\partial T_{(x,y,t)}}{\partial t} = \lambda_l \nabla^2 T_{(x,y,t)} + Q_{(x,y,t)} - \sigma \varepsilon_l (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_0) \quad (\text{II.8})$$

La transition entre la phase solide et la phase liquide est prise en compte. Nous calculons le flux d'énergie $d\phi$ [122], et nous le comparons à l'enthalpie de fusion. Nous supposons que, pendant la transition de phase, la température de soudage varie linéairement. Le flux d'énergie est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$d\phi = \left(\lambda_{sl} \text{grad} T_{(x,y,t)} \cdot \vec{n} \cdot ds - \varepsilon_{sl} ds (T_{(x,y,t)}^4 - T_0^4) - h ds (T_{(x,y,t)} - T_0) \right) dt + Q(x, y, t) ds dt \quad (\text{II.9})$$

4.3. Modèle numérique et conditions aux limites

Pour le modèle numérique, la Méthode des Différences Finies (FDM) est utilisée pour simuler le comportement thermique. La méthode des différences finies FDM est une des méthode d'approximation des équations qui se base sur la reformulation des équations de conservation sur chaque nœud du maillage afin de représenter les problèmes continus de façon discrète [123, 124, 125]. L'idée principale est de remplacer les équations aux dérivées partielles par un ensemble équivalent et approximatif d'équations algébriques. Les équations (II.7), (II.8) et (II.9) sont discrétisées en l'espace et en temps, et présentées dans les équations (II.10), (II.11) et (II.12) suivantes :

- Pour la phase solide :

$$\alpha_1 T_{(i-1,j)}^{n+1} - \alpha_2 T_{(i,j)}^{n+1} + \alpha_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n - \alpha_3 (T_{(i,j-1)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}) - \alpha_4 Q_{(i,j)}^{n+1} - \beta_1 \quad (\text{II.10})$$

- Pour la phase liquide :

$$\alpha_5 T_{(i-1,j)}^{n+1} - \alpha_6 T_{(i,j)}^{n+1} + \alpha_5 T_{(i+1,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n - \alpha_7 (T_{(i,j-1)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}) - \alpha_8 Q_{(i,j)}^{n+1} - \beta_2 \quad (\text{II.11})$$

- Pour le changement de phase solide/liquide :

$$d\phi_{(i,j)} = 2\gamma_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} - \gamma_2 T_{(i-1,j)}^{n+1} + 2\gamma_1 T_{(i,j+1)}^{n+1} + \gamma_3 \quad (\text{II.12})$$

Où: i et j sont les pas de l'espace pour les axes x et y respectivement (pour les indices maillés), n est le pas de temps, les paramètres: α_k , β_k et γ_k sont des constantes et des paramètres liés aux propriétés physiques et numériques du système discrétisé.

Un programme numérique en FORTRAN a été développé. L'algorithme itératif de Gauss-Seidel a été utilisé pour résoudre les équations discrétisées. La construction du maillage va dépendre de la géométrie et de la taille du faisceau laser ainsi que de sa vitesse par rapport à la pièce. Le maillage choisi est construit de deux domaines comme le montre la **figure II.5**. Près du cordon, le domaine est discrétisé avec un maillage fin suivant x , cette partie est caractérisée par un fort gradient de température. Pour le deuxième domaine on a choisi un maillage grossier ; le gradient des températures est faible.

Illustrées sur la **figure II.5**, les conditions aux limites sont proposées comme suit :

- (1) Sur l'axe $y = 0$: $(\partial T / \partial y)_{y=0} = 0$
- (2) Pour $y = L_y$; $(\partial T / \partial y)_{y=L_y} = 0$
- (3) Pour $x = L_x$; $T(L_x, y) = T_0$
- (4) Sur l'axe de symétrie ($x = 0$), nous avons supposé un flux de chaleur nul sur le contact entre les deux pièces à assembler.

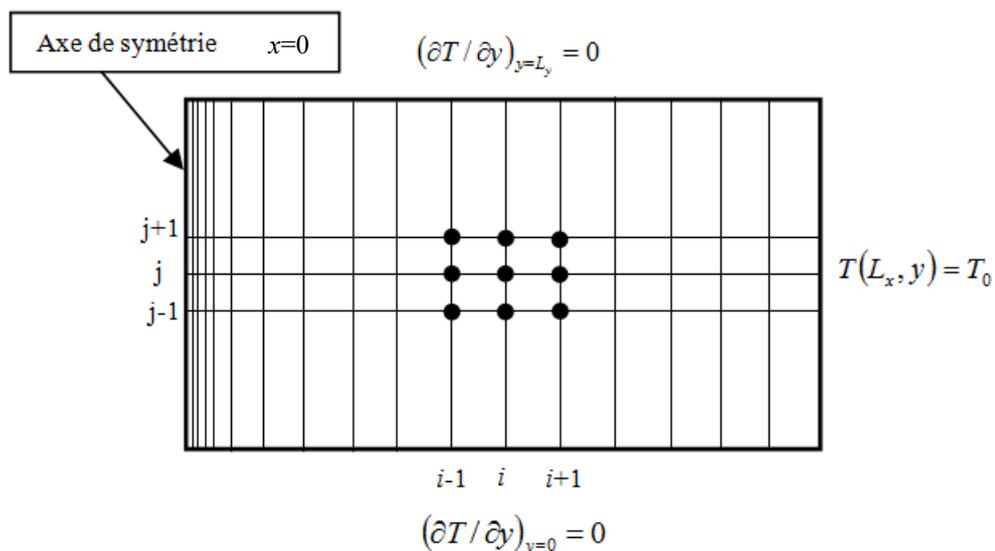


Figure II.5 : Géométrie, maillage et conditions aux limites

Le schéma général de calcul, pour un pas de temps n , est le suivant :

- Pour une valeur donnée de j :
 - a) Identification de la phase des nœuds (solide, liquide, transition de phase) pour toutes les valeurs i ,
 - b) Calcul des éléments de la matrice A et B pour les différentes valeurs de i ,
 - c) Calcul de la température $T^n(i, j)$, à l'instant n , par la méthode itérative de Gauss-Seidel,
 - d) Répétition des étapes a) à c) pour d'autres valeurs $j' = j + 1$,
- Vérification de la convergence et de la stabilité de la solution $T^n(i, j)$ pour le même pas de temps n pour toutes les valeurs i et j ,
- Calcul pour l'étape suivante $n + 1$ si la convergence est vérifiée.

5. Modélisation mathématique et numérique cas 3D

5.1. Source de l'énergie

Pendant le soudage laser, une source d'énergie sera formée pour transmettre l'énergie au métal. Afin de simuler la distribution de chaleur le long de la direction de soudage. La source de l'énergie est considéré une source volumique mobile. Deux formules sont utilisées :

- a)** Une source avec une distribution volumique gaussienne (**figure II.6**) selon la formule [25] :

$$Q(x, y, z) = \frac{3P}{abc\pi} \exp\left(-\frac{3(x(i))^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3(y(j))^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3(z'(k))^2}{c^2}\right) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

P : La puissance du laser (W)

a, b : Rayons focaux (m)

c : Pénétration maximale (m)

$b = b_1$ pour les points en avant

$b = b_2$ pour les points en arrière

$z'(k) = Z_{max} - z(k)$

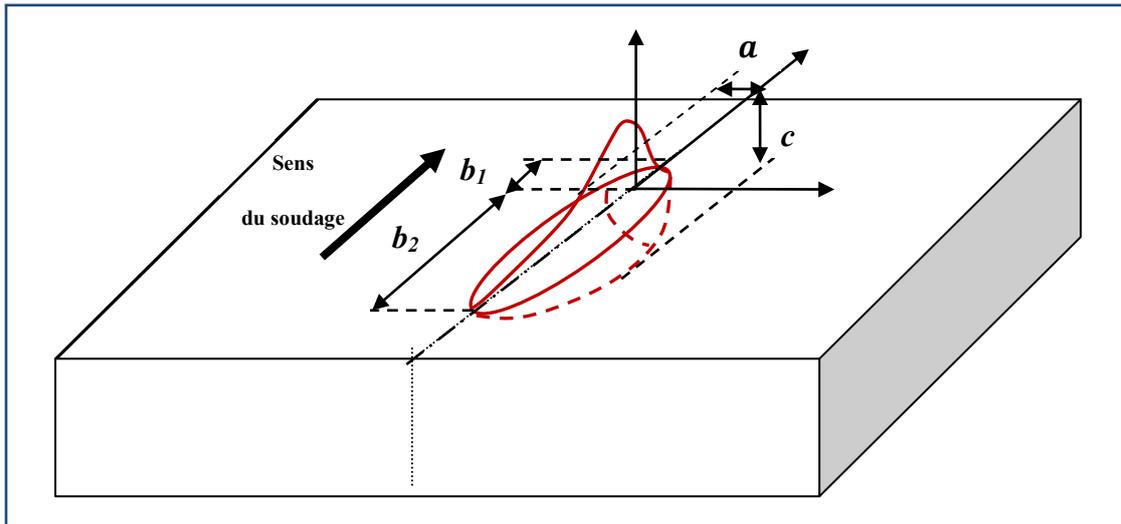


Figure II.6 : Source volumique gaussienne

b) La source est un cône suivant une distribution gaussienne d'énergie [81]. Cette source est illustrée sur la **figure II.7 (a)**, qui sera utilisée selon la formule :

$$Q(r, z, t) = Q_0 \exp\left(\frac{-r^2(t)}{R_z^2}\right) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$r^2(t) = x^2 + (y - Vt)^2 \text{ et } R_z = az + b$$

Les paramètres a et b sont : $a = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}}$ et $b = R_{\max} - aZ_{\max}$

R_{\max} , R_{\min} , Z_{\max} et Z_{\min} sont définis sur la **figure II.7 (b)**

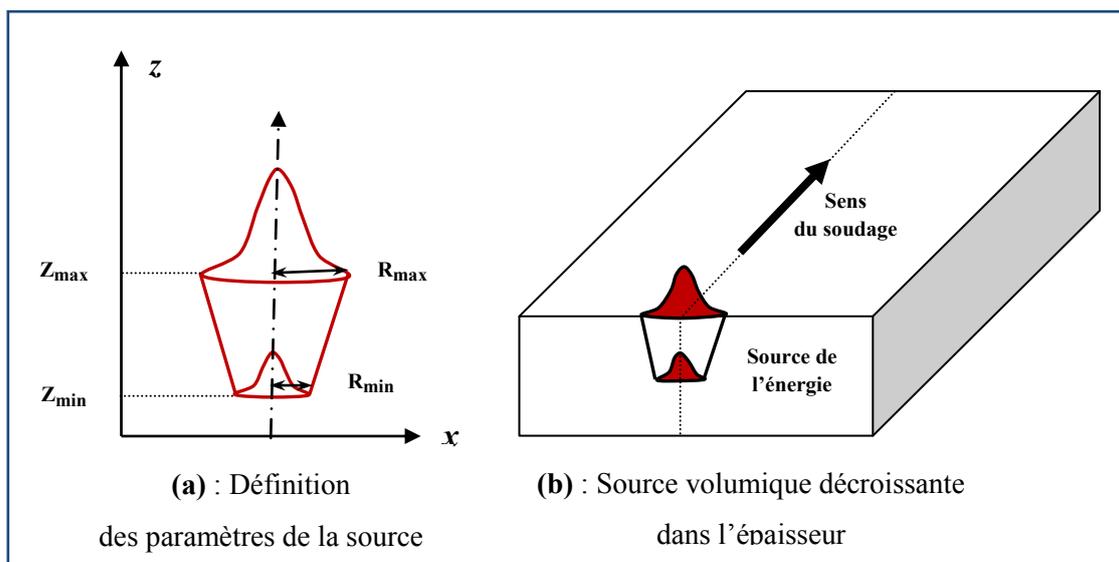


Figure II.7 : Source volumique conique suivant une distribution gaussienne

Les valeurs des différents paramètres utilisés pour définir la source de l'énergie sont présentées dans le **tableau II.6**.

Tableau II.6 : Valeurs des paramètres de la source d'énergie

Paramètre	Valeur
R_{\max}	0.20-0.40 mm
R_{\min}	0.15-0.30 mm
Z_{\max}	6-10 mm
Z_{\min}	4-8 mm
Vitesses	0.040-0.060 m/s

Les valeurs sont choisies suivant les observations expérimentales de J. Ahn et al. [82] et les calculs numériques de S. Lemkeddem et al. [122].

5.2. Hypothèses et équations gouvernantes

La configuration géométrique du problème et le système de coordonnées cartésien correspondant sont illustrés sur la **figure II.8**. La formulation mathématique du modèle repose sur les mêmes hypothèses considérées pour le modèle 2D. Le phénomène des pertes par rayonnement et convection est supposé faible dans la profondeur devant la conduction; c'est pour cela que les pertes sont prises en considération que pour $z = 0$ et $z = z_{\max}$ (faces ADFG et BCEH).

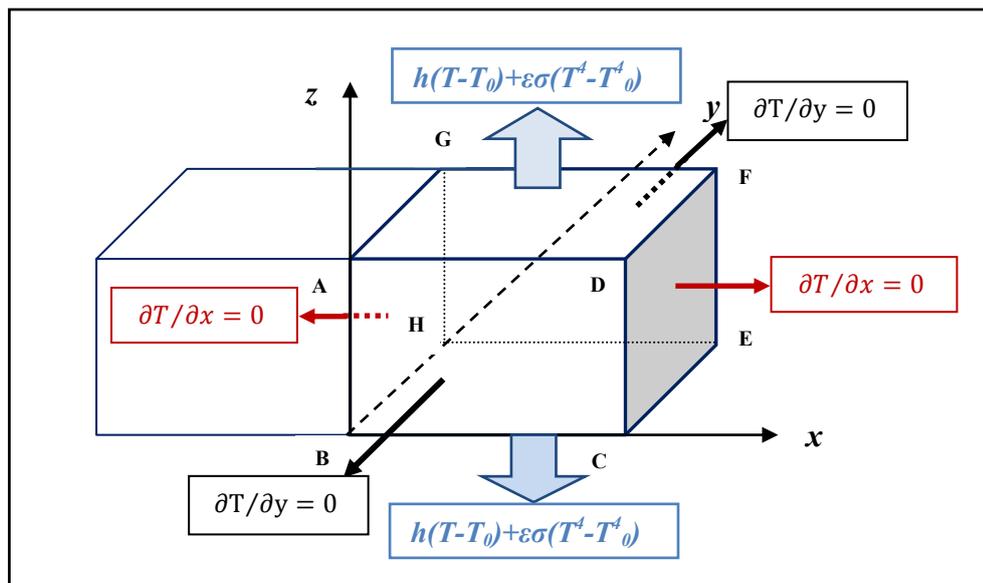


Figure II.8: Géométrie de l'espace de résolution et conditions aux limites

Durant la phase solide la distribution de la chaleur est gouvernée par l'équation suivante :

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_{(x,y,z,t)}}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_{(x,y,z,t)} + Q(x, y, z, t) - h(T_{(x,y,z,t)} - T_\infty) - \sigma(T_{(x,y,z,t)}^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.15})$$

Avec :

C_s : Chaleur spécifique à l'état solide.

ρ_s : Densité à l'état solide.

λ_s : Conductivité thermique à l'état solide.

$Q(x, y, z, t)$: Terme source

Durant la phase liquide la distribution de la chaleur est gouvernée par l'équation suivante :

$$\rho_l C_l \frac{\partial T_{(x,y,z,t)}}{\partial t} = \lambda_l \nabla^2 T_{(x,y,z,t)} + Q(x, y, z, t) - h(T_{(x,y,z,t)} - T_\infty) - \sigma \varepsilon (T_{(x,y,z,t)}^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.16})$$

C_l : Chaleur spécifique à l'état liquide

ρ_l : Densité à l'état liquide

λ_l : Conductivité thermique à l'état liquide

$Q(x, y, z, t)$: Terme source

Durant le changement de phase solide/liquide le flux de chaleur est calculé par la relation suivante :

$$d\Phi = -\lambda_{sl} \overrightarrow{\text{grad}T} \cdot \vec{n} \cdot ds - h(T_{(x,y,z,t)} - T_\infty) - \sigma \varepsilon (T_{(x,y,z,t)}^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$d\Phi$: Flux de chaleur

λ_{sl} : Conductivité thermique

Nous avons supposé aussi que la température de soudage varie linéairement pendant la transition de phase.

5.3. Modèle numérique et conditions aux limites

Pour le modèle numérique, la méthode des différences finies (FDM) a été utilisée pour simuler le comportement thermique. Comme c'est mentionné dans la **section 2.2 du chapitre II**, les équations aux dérivées partielles sont remplacées par un ensemble

équivalent et approximatif d'équations algébriques. Les équations (II.15), (II.16) et (II.17) sont discrétisées dans l'espace et dans temps; elles peuvent être écrites comme suit :

- Pour la phase solide :

$$\begin{aligned} \alpha_1 T_{(i-1,j,k)}^{n+1} - \alpha_2 T_{(i,j,k)}^{n+1} + \alpha_1 T_{(i+1,j,k)}^{n+1} \\ = T_{(i,j,k)}^n - \alpha_3 (T_{(i,j+1,k)}^{n+1} + T_{(i,j-1,k)}^{n+1}) + \alpha_4 (T_{(i,j,k+1)}^{n+1} + T_{(i,j,k-1)}^{n+1}) \\ - \alpha_5 Q_{(i,j)}^{n+1} - \beta_1 \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

- Pour la phase liquide :

$$\begin{aligned} \alpha_6 T_{(i-1,j,k)}^{n+1} - \alpha_7 T_{(i,j,k)}^{n+1} + \alpha_6 T_{(i+1,j,k)}^{n+1} \\ = T_{(i,j,k)}^n - \alpha_8 (T_{(i,j+1,k)}^{n+1} + T_{(i,j-1,k)}^{n+1}) + \alpha_9 (T_{(i,j,k+1)}^{n+1} + T_{(i,j,k-1)}^{n+1}) \\ - \alpha_{10} Q_{(i,j)}^{n+1} - \beta_2 \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

- Pour le changement de phase solide/liquide :

$$\begin{aligned} d\Phi_{(i,j,k)} = \left(2\gamma_1 + 2\gamma_2 + 2\gamma_3 - \gamma_5 - \gamma_6 T_{(i,j,k)}^{3n+1} \right) T_{(i,j,k)}^{n+1} \\ - \gamma_1 (T_{(i+1,j,k)}^{n+1} + T_{(i-1,j,k)}^{n+1}) - \gamma_2 (T_{(i,j+1,k)}^{n+1} + T_{(i,j-1,k)}^{n+1}) \\ - \gamma_3 (T_{(i,j,k+1)}^{n+1} + T_{(i,j,k-1)}^{n+1}) + \gamma_5 T_0 + \gamma_6 T_0^4 \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

Où: i, j et k sont les pas de l'espace pour les axes x, y et z respectivement (pour les indices maillés), n est le pas de temps, les paramètres: α_k, β_k et γ_k sont des constantes et des paramètres qui dépendent des propriétés physiques et de l'approximation utilisée du système discrétisé. La construction du maillage va dépendre de la géométrie et de la taille du faisceau laser ainsi que sa vitesse par rapport à la pièce. Le maillage est choisi d'être régulier suivant y et z . Suivant x le maillage est irrégulier et suffisamment fin près du cordon à cause du fort gradient de température. Les simplifications et les suppositions présentés dans cette modélisation permettrons essentiellement de diminuer l'espace mémoire et le temps de calcul.

Les équations précédentes sont valables pour les positions $i=2, i_{\max}-1, j=2, j_{\max}-1$ et $k=2, k_{\max}-1$. Les conditions aux limites sont imposées comme suit (illustrées sur la figure II.8) :

(1) Pour $y=0$ (Face avant ABCD) : $(\partial T / \partial y)_{y=0} = 0$

(2) Pour $y=y_{\max}$ (Face arrière EFGH) : $(\partial T / \partial y)_{y=y_{\max}} = 0$

- (3) Pour $x = 0$ (Face Gauche ABHG qui présente un plan de symétrie) : le flux de chaleur est supposé nul sur le contact entre deux pièces à assembler
- (4) Pour $x = x_{\max}$ (Face droite CDEF) : $(\partial T / \partial x)_{x=x_{\max}} = 0$
- (5) Pour $z = 0$ (Face inférieure=BCEF) : $(\partial T / \partial z)_{z=0} = 0$
- (6) Pour $z = z_{\max}$ (Face supérieure=BCEF) : $(\partial T / \partial z)_{z=z_{\max}} = 0$
- (7) Les pertes par rayonnement et par convection sont prises en considération sur la face supérieure et la face inférieure.

Les équations sont réorganisées sous une forme matricielle $A.X = B$. Les inconnus X présentent les températures et la matrice A possède une forme tridiagonale. L'algorithme itératif de Gauss-Seidel [126] a été utilisé pour résoudre le système d'équations matriciel. L'organigramme du calcul numérique est présenté sur la **figure II.9**.

A chaque instant, noté n , et pour chaque nœud (i, j, k) une identification de phase est appliquée pour $i = 1, i_{\max}, j = 1, j_{\max}$ et $k = 1, k_{\max}$. Cette procédure permet de connaître l'état sous lequel se présente la matière : solide, liquide ou changement d'état solide/liquide afin d'appliquer les équations appropriées. Pour assurer la convergence un calcul itératif se fait par une boucle sur m . Un programme numérique en langage FORTRAN a été développé pour résoudre le problème en utilisant les données et les propositions précédentes.

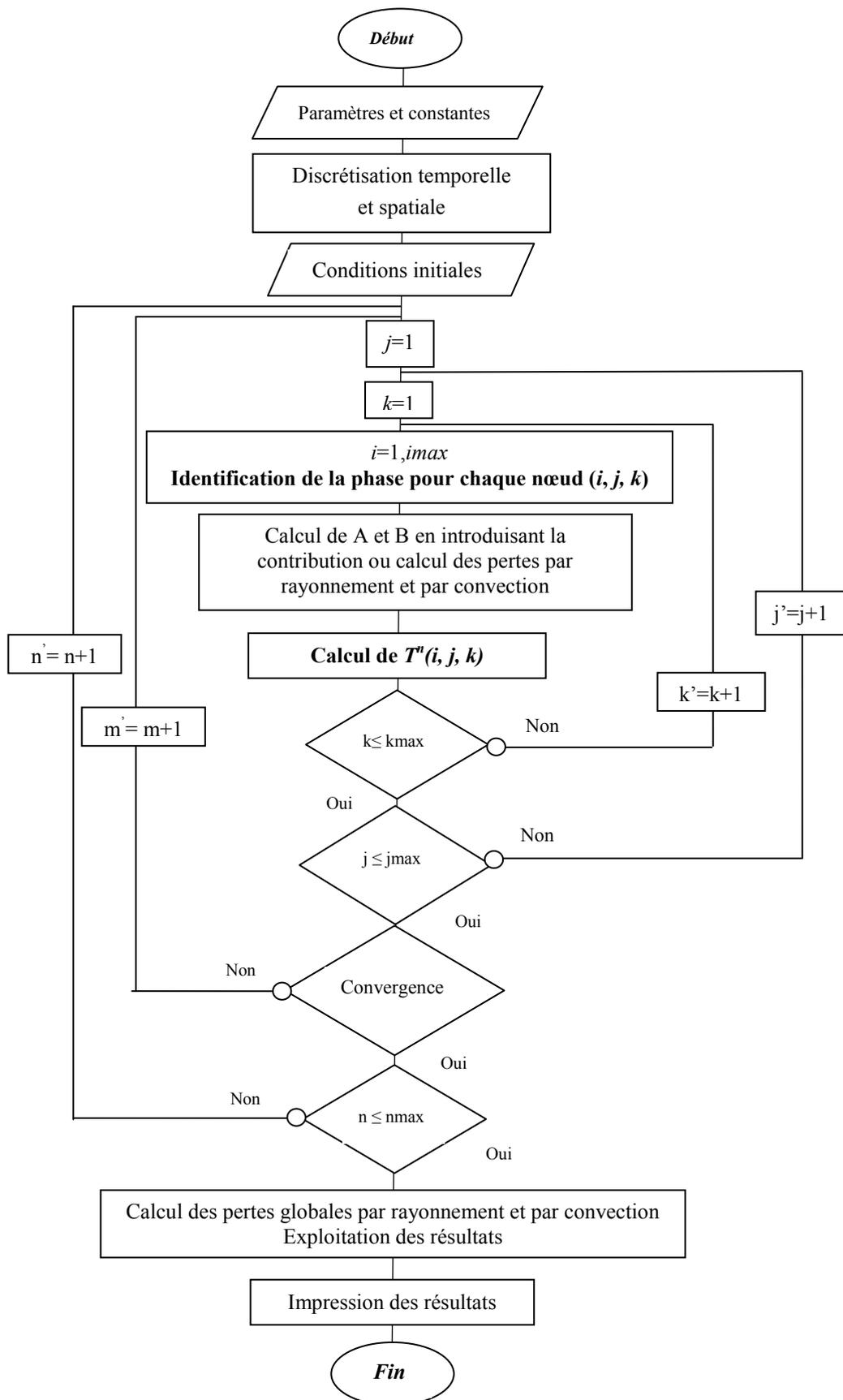


Figure II.9 : Organigramme du calcul numérique pour un traitement en 3D

CHAPITRE 3

Résultats et discussions

*« L'expérience est une bougie qui n'éclaire que celui
qui la porte. »*
[Philosophe chinois]

Chapitre 3 :

Résultats et discussions

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats numériques de l'étude du comportement thermique des plaques métalliques lors du soudage laser.

Tout d'abord une étude 2D du comportement thermique pour les plaques minces est présentée. Les conditions de soudage appropriées issues des calculs numériques seront présentées et comparées avec des résultats expérimentaux antérieurs. En revanche, des études paramétriques peuvent être effectuées et discutées pour plusieurs valeurs de puissances de laser et vitesses de soudage.

Une autre étude des plaques minces en 3D est présentée et est comparer avec les résultats de l'étude 2D des plaques minces. Les plaques épaisses sont traitées en 3D ce qui permet d'étudier leur comportement thermique lors des procédés de soudage. Les pertes d'énergie par rayonnement et par convection seront ensuite présentées et discutées en fonction de plusieurs paramètres.

2. Etude 2D du comportement thermique des plaques métalliques soudées par laser

Comme c'est mentionné dans la **section 4.2** du **chapitre II**, la modélisation du comportement thermique dans le cas 2D est basée sur l'idée de simplifier l'étude en se basant sur des critères bien étudiés (dimension des plaques, maillage irrégulier,...). Ce qui permet de diminuer l'espace mémoire et le temps de calcul nécessaire pour la résolution numérique du problème.

Les paramètres du modèle géométrique et du soudage utilisés dans les calculs sont présentés dans le **tableau III.1**. Les dimensions d'une plaque en alliage de titane TA6V sont $L_x = 0.050$ m de longueur et $L_y = 0.006$ m de largeur. Avec une vitesse de soudage moyenne de $V = 0.060$ m / s, le temps nécessaire pour souder une distance de 0.006 m est de 0.1 s. Le rayon du faisceau laser est $R = 0.30$ mm. Avec ces conditions,

la distribution de température a été calculée en fonction du temps et de la position pendant le soudage (le chauffage et le refroidissent).

Tableau III.1: Paramètres du modèle géométrique et du soudage

Paramètres	Valeurs
Longueur des plaques	$L_x = 0.050$ m
Largeur des plaques	$L_y = 0.006$ m
Rayon du laser	$R = 0.25-0.50$ mm
Vitesses de soudage	$V = 0.030-0.060$ m/s
Puissances	$P = 2000-2500$ W

Pour obtenir un calcul stable, la valeur maximale du pas de temps était $\Delta t = 4.10^{-5}$ s avec un maillage irrégulier ($\Delta x =$ variable et $\Delta y = 5.10^{-5}$ m). Pour augmenter la précision des calculs, on doit vérifier $\Delta t \leq 10^{-5}$ s pour les propriétés de l'alliage et les conditions de soudage utilisées dans cette étude. Les tailles des mailles sont variantes et le pas de temps est généralement déterminée par les mailles les plus petites ($\Delta x = 5.10^{-5}$ m et $\Delta y = 5.10^{-5}$ m). Le calcul, pour le temps de soudage proposé et pour les dimensions des deux plaques et la puissance du laser, sera stable et n'affectera pas la généralité des résultats.

2.1. Source d'énergie

Pour une source surfacique, une formule du terme source suivant la formule (II.5) est utilisée. Le profil de la source suivant x pour une puissance $P = 2400$ W et un rayon de $R = 0.30$ mm est présenté sur la **figure III.1**.

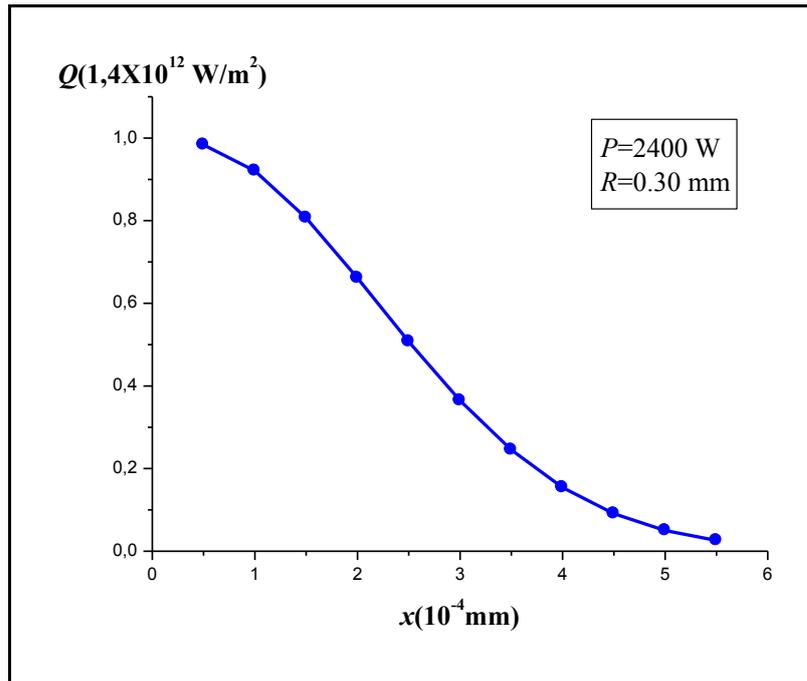


Figure III.1 : Profil de la source surfacique en fonction de x utilisé dans le cas 2D

2.2. Profil des températures pour le soudage de l'alliage de TA6V

Quelques exemples sur les profils des températures obtenus en fonction du temps durant le chauffage et le refroidissement des plaques en alliage de titane TA6V par soudage laser sont présentés sur la figure III.2.

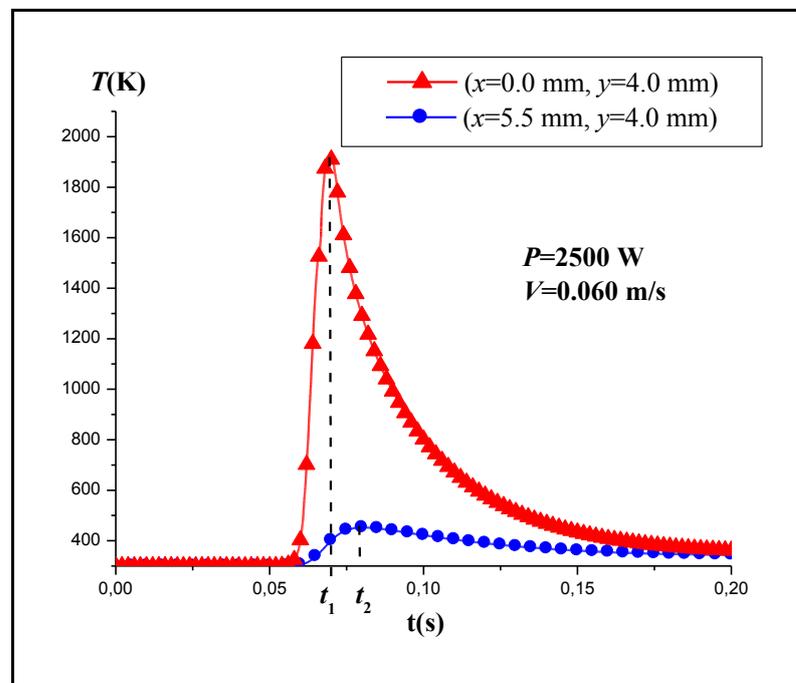


Figure III.2 : Profils des températures pour $P=2500 \text{ W}$ et $V=0.060 \text{ m/s}$ pour les positions $(x=0.0 \text{ mm}, y=4.0 \text{ mm})$ et $(x=5.5 \text{ mm}, y=4.0 \text{ mm})$

Les conditions de soudage sont $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s pour deux positions : au niveau du cordon ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm) et loin du cordon ($x = 5.5$ mm, $y = 4.0$ mm).

À l'instant $t=0$ s le traitement débute avec un état initial qui est une température uniforme de 300 K dans toute la pièce. Ensuite au fur et à mesure que la source de chaleur se déplace, nous pouvons remarquer sur le cordon qu'un important gradient de température est produit au début du chauffage. Le profil de température doit se rapprocher légèrement de la température initiale pendant le refroidissement à cause des pertes par rayonnement et convection. Cette tendance est clairement observée pour les deux positions. Les instants correspondants aux températures maximales $t(s)$ pour les deux positions ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm) et ($x = 5.5$ mm, $y = 4.0$ mm) sont présentés sur le **tableau III.2**. On remarque qu'au niveau d'un point loin du cordon de soudure ($x = 5.5$ mm), la température atteint son maximum après environ 0.01 s du passage de la source par le point de la même ordonnée y sur le cordon de soudure ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm).

Tableau III.2 : Instants correspondants aux températures maximales pour deux points qui ont la même ordonnée y

Positions	Températures maximales T(K)	Instants correspondants aux températures maximales t(s)
($x=0.0$ mm, $y=4.0$ mm)	1932.2	$t_1 = 0.070$ s
($x=5.5$ mm, $y=4.0$ mm)	452.4	$t_2 = 0.080$ s

On remarque qu'en s'éloignant du cordon, la température maximale atteinte diminue. En plus, la température maximale est atteinte après un temps plus long si le point est loin du cordon. Ce comportement a été observé dans d'autres travaux, comme dans le travail de doctorat de M. Hamide [36] qui a traité la modélisation numérique des aciers du soudage à l'arc. Ce comportement a été aussi marqué par S. Belhadj [66] lors de l'étude expérimentale et numérique du soudage laser de l'alliage de magnésium AM60.

L'évolution de la température sur le cordon de soudure est présentée sur la **figure III.3** pour des différentes positions ($x = 0.0$, $y = 3.0$ mm), ($x = 0.0$, $y = 3.5$ mm) et ($x = 0.0$, $y = 4.0$ mm) et pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s. La même allure peut être observée dans d'autres courbes dans la littérature comme dans le travail de G. Tirand et al. en 2013 [26] et dans le travail de M. Akbari et al. en 2014 [75] comme le montre les **figures III.4 et III.5**.

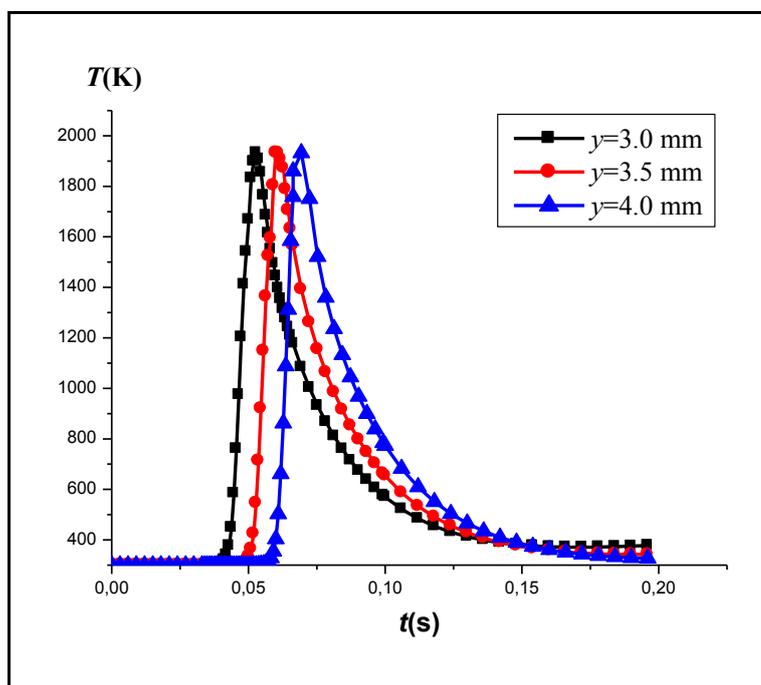


Figure III.3 : Profils des températures pour différentes positions sur le cordon ($P=2500$ W, $V=0.060$ m/s) [122]

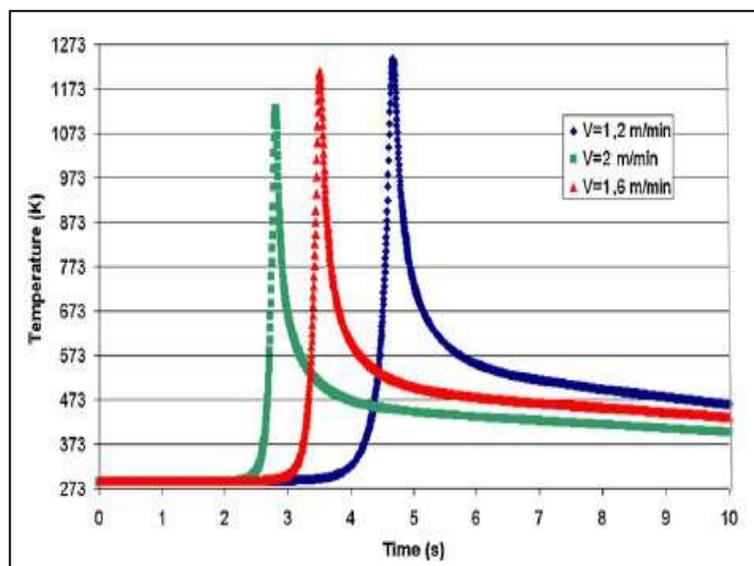


Figure III.4 : Températures calculées en fonction du temps pour un point sur le cordon de soudure pour trois conditions de soudage [26].

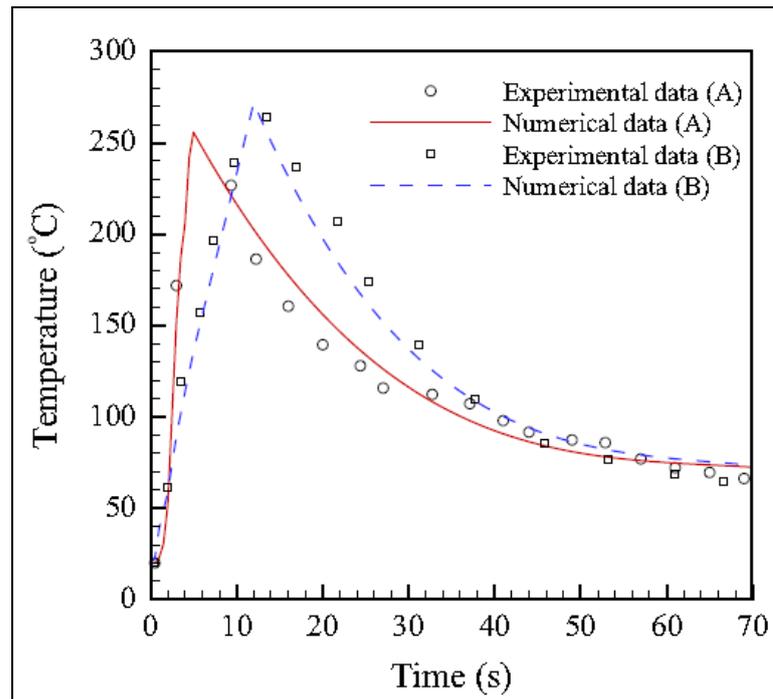


Figure III.5 : Résultats simulés et expérimentaux de distribution de température pour deux points A et B près du cordon de soudure pour une vitesse de soudage $V=3$ mm/s [75].

Les variations de la température sont présentées dans la **figure III.6** en fonction de x durant le soudage pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s à l'instant $t = 0.05$ s.

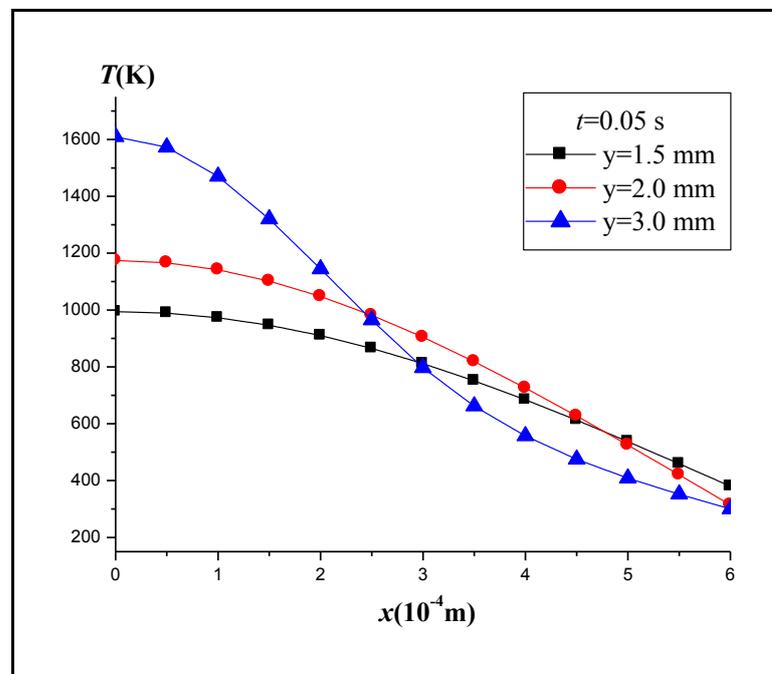


Figure III.6 : Variations des températures en fonction des positions x à l'instant $t = 0.05$ s pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s [122]

La **figure III.6** montre que pendant le soudage au laser, il existe un gradient thermique important près du cordon ($x = 0$). La température peut varier entre 400 K et 1500 K à une distance inférieure à 0.4 mm du cordon de soudure; à noter que $R = 0.30$ mm.

2.3. Profil des températures pour le soudage de l'alliage AM60

D'autres calculs peuvent être effectués pour déterminer le comportement thermique des plaques pour d'autres alliages. L'alliage de magnésium AM60 a été utilisé et les profils des températures obtenus en fonction du temps sont présentés dans la **figure III.7**. Ces profils sont présentés pour quatre points situés à différentes distances par rapport au cordon de soudure pour $P = 3000$ W et $V = 0.060$ m/s. On remarque qu'en s'éloignant de la source de l'énergie, la température maximale atteinte diminue. En plus, la température maximale est atteinte après un temps plus long si le point est loin de la source. Ce comportement a été marqué dans **figure III.2** dans le cas du soudage laser de l'alliage de titane TA6V et dans d'autres travaux [36, 66].

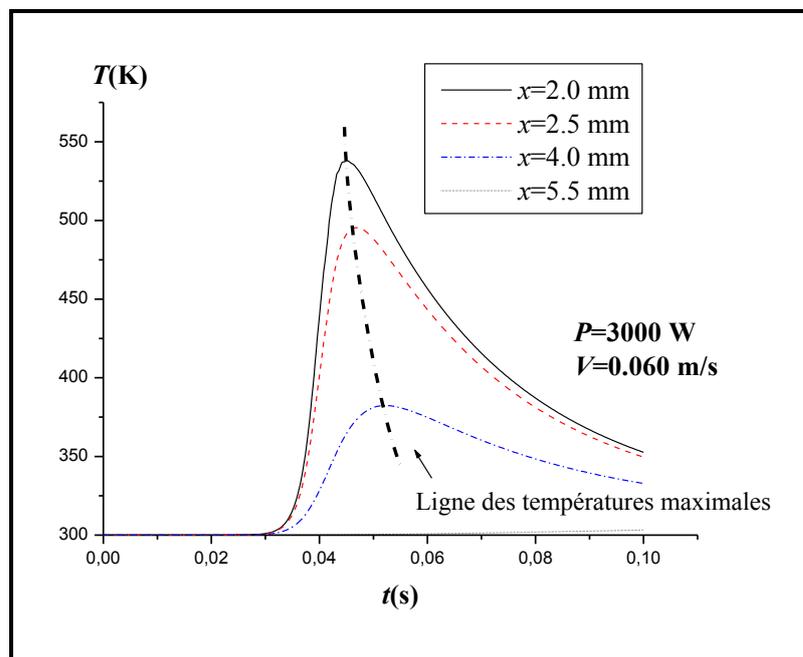


Figure III.7 : Profils des températures en fonction du temps pour différents positions x lors de soudage laser de l'alliage de magnésium AM60

2.4. Conditions appropriées de soudage

La fusion d'un matériau est la condition principale d'avoir une soudure. Dans le cas de l'alliage de TA6V la gamme de température de fusion est de 1913 K à 1933 K. Nous avons cherché les conditions de soudage appropriées, les résultats sont

en bon accord avec les résultats expérimentaux de F. Caiazzo et al. en 2003 [64] et J. Ahn et al. en 2016 [82]. Les résultats sont présentés dans le **tableau III.3**.

Tableau III.3 : Conditions appropriées au soudage des plaques en TA6V [122]

Puissance du laser	Nos résultats numériques	Résultats expérimentaux de J. Ahn et al. [82]	Résultats expérimentaux de F. Caiazzo et al. [64]
$P = 2000W$	$V \leq 0.040$ m/s	$V = 0.030-0.070$ m/s	$V = 0.024$ m/s
$P = 2500W$	$V \leq 0.065$ m/s	$V = 0.030-0.080$ m/s	$V = 0.036$ m/s

Dans le cas de l'alliage de magnésium AM60, la gamme de température de fusion est autour de la température de fusion $T_f = 883$ K. Nous avons cherché les conditions de soudage appropriées, les résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux de A. Belhadj en 2006 [66]. Les résultats sont présentés dans le **tableau III.4**.

Tableau III.4 : Conditions appropriées au soudage des plaques en AM60

Puissance du laser	Nos résultats numériques	Résultats expérimentaux de A. Belhadj [66]
$P = 2500W$	$V = 0.040-0.070$ m/s	$V = 0.060-0.090$ m/s
$P = 3000W$	$V = 0.060-0.080$ m/s	$V = 0.070-0.100$ m/s

2.5. Vitesses de chauffage et de refroidissement

Sur la plaque, les vitesses instantanées de chauffage et de refroidissement sont calculées à chaque point par la relation suivante :

$$v(t) = \frac{T(t + dt) - T(t)}{dt} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

$v(t)$: Vitesse de chauffage ou de refroidissement à l'instant t

$T(t)$: Température à l'instant t

Dans le cas de soudage laser des plaques en alliage de titane TA6V, les vitesses de chauffage et de refroidissement pour le point ($x=0.0$ mm, $y=4.0$ mm) sont calculées et présentées sur la **figure III.8**. Les conditions de soudage sont $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s.

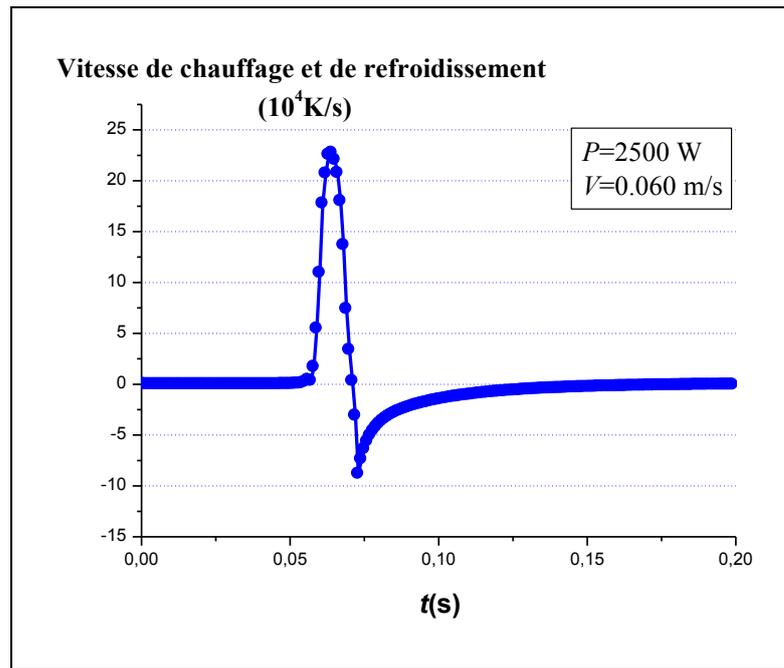


Figure III.8 : Évolution de la vitesse de chauffage et de refroidissement en fonction du temps au point ($x=0.0 \text{ mm}$, $y=4.0 \text{ mm}$)

La pente positive présente le du chauffage et la pente négative présente le refroidissement. C'est clair que la vitesse de chauffage est plus grande que celle de refroidissement et cela peut être expliqué par le transfert d'énergie de la source laser au matériau qui est plus rapide que le transfert et la propagation de la chaleur dans le matériau (et la perte par rayonnement et par convection) durant le refroidissement. Le maximum de cette courbe est ($t_{\text{max}} = 0.065 \text{ s}$, $v_{\text{max}} = 22.05 \times 10^4 \text{ K/s}$) cela correspond juste 0.005 s avant le passage du laser par ce point ($t=0.07 \text{ s}$). Pour ces conditions de soudage la vitesse de propagation est supérieure à celle du laser.

Dans les mêmes conditions de puissance et de vitesse ($P = 2500 \text{ W}$ et $V = 0.060 \text{ m/s}$) pour le soudage des plaques en TA6V, les vitesses de chauffage et de refroidissement pour le point ($x = 5.5 \text{ mm}$, $y = 4.0 \text{ mm}$) sont calculées et présentées sur la **figure III.9**. Le maximum de cette courbe est ($t_{\text{max}} = 0.070 \text{ s}$, $v_{\text{max}} = 1.32 \times 10^3 \text{ K/s}$).

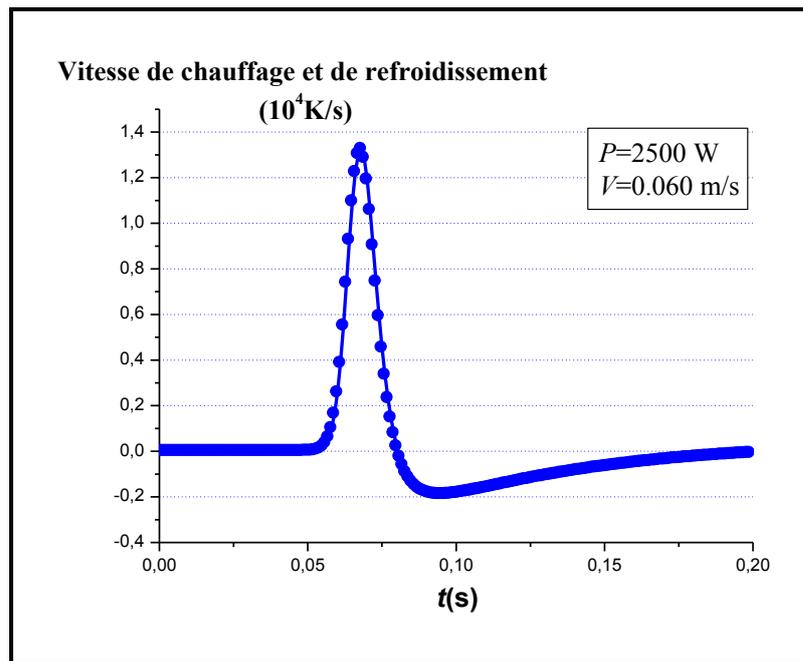


Figure III.9 : Évolution de la vitesse de chauffage et de refroidissement en fonction du temps au point ($x=5.5$ mm, $y=4.0$ mm)

Le **tableau III.5** présente les valeurs maximales des vitesses de chauffage et de refroidissement pour les conditions de soudage choisies sur les positions ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm) et ($x = 5.5$ mm, $y = 4.0$ mm).

Tableau III.5 : Vitesses maximales de chauffage et de refroidissement sur et loin du cordon de soudure

Positions	Vitesses maximales de chauffage (10^4 K/s)	Vitesses maximales de refroidissement (10^4 K/s)
Sur le cordon ($x=0.0$ mm, $y=4.0$ mm)	22.05	-8.84
Loin du cordon ($x=5.5$ mm, $y=4.0$ mm)	1.32	-0.19

Sur le cordon, les vitesses de chauffage et de refroidissement sont les plus grandes, elles dépassent respectivement 22×10^4 K/s et -8.8×10^4 K/s. Au niveau du cordon, les calculs de ces vitesses sont très utiles pour étudier les structures des alliages au niveau des changements de phases et l'intervalle de solidification ainsi que la favorisation des formations de certaines phases métallurgiques [85].

2.6. Profil des températures pour différentes valeurs de vitesse

La **figure III.10** montre l'évolution de la température lors d'une soudure laser de l'alliage de titane TA6V pour une puissance $P = 2500$ W et différentes valeurs de vitesses de soudage au point ($x = 0.0$ mm, $y = 3.0$ mm).

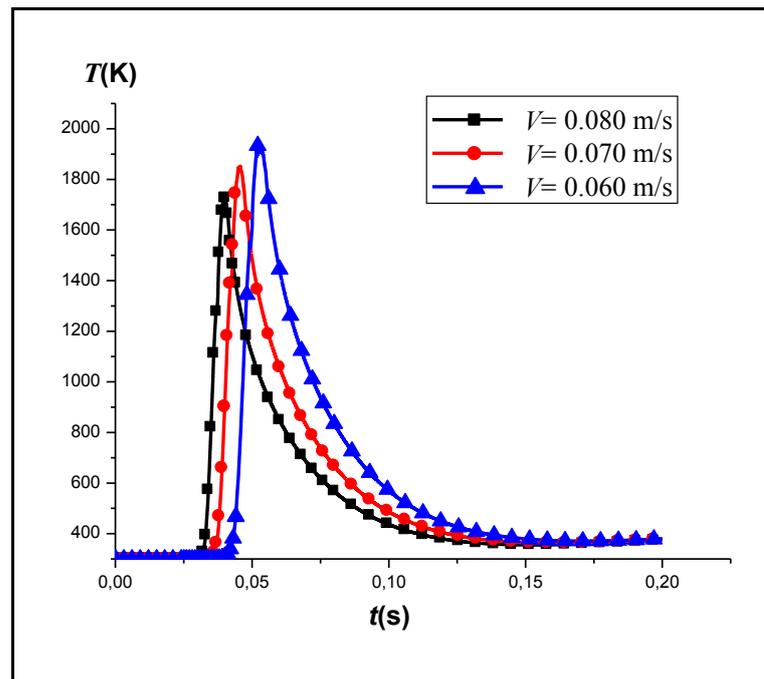


Figure III.10 : Profils des températures pour $P=2500$ W et pour différentes vitesses de laser au point ($x = 0$ mm, $y = 3.0$ mm) [122]

Une tendance similaire de l'évolution de la température peut être observée pour différentes vitesses. Les valeurs des températures maximales T_{max} ainsi que les instants correspondants t (s) sont présentés sur le **tableau III.6**.

Tableau III.6 : Températures maximales pour $P=2500$ W et différentes vitesses au point ($x = 0$ mm, $y = 3.0$ mm)

V (m/s)	T_{max} (K)	t (s)
0.060	1932.6	0.050
0.070	1851.9	0.045
0.080	1726.1	0.040

Pour une puissance de $P = 2500$ W et des vitesses de soudage $V \leq 0.060$ m/s, la température peut atteindre la température de fusion sur le cordon de soudure. C'est clair que la température maximale atteinte augmente en diminuant la vitesse de soudage. Ces températures maximales sont atteintes dans des instants différents, c'est logique puisque les vitesses de soudage sont différentes.

2.7. Profil des températures pour différentes valeurs de puissance

La **figure III.11** montre l'évolution de la température pour une vitesse $V = 0.060$ m/s et différentes valeurs de puissance au point ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm).

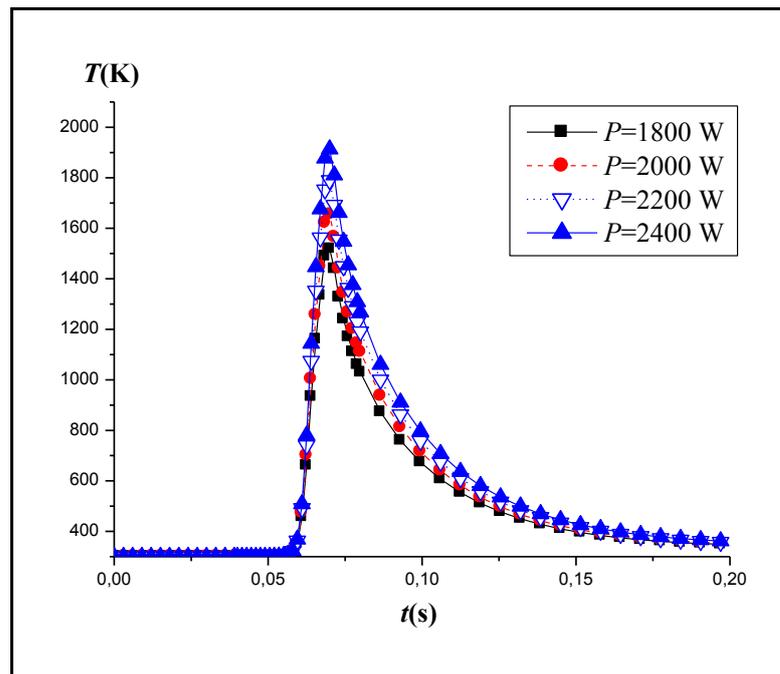


Figure III.11 : Profils des températures pour $V = 0.060$ m/s et différentes valeurs de puissance au point ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm)

Pour différentes puissances les profils des températures possèdent des allures similaires. Les valeurs des températures maximales T_{\max} ainsi que les instants correspondants t (s) sont présentés sur le **tableau III.7**.

Tableau III.7 : Températures maximales atteintes pour $V = 0.060$ m/s et différentes valeurs de puissance au point ($x = 0.0$ mm, $y = 4.0$ mm)

P (W)	T_{\max} (K)	t (s)
1800	1521.98	0.07
2000	1657.75	0.07
2200	1793.52	0.07
2400	1924.02	0.07

C'est clair que la température maximale atteinte augmente lorsque la puissance augmente. Pour une même vitesse de soudage, les températures maximales sont atteintes dans des temps similaires.

2.8. Profil des températures en fonction de rayon R

Le profil des températures en fonction de rayon de la source R est présenté sur la **figure III.12**. Les conditions utilisées sont $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s. La **figure III.13** montre les variations des températures maximales au centre du cordon de soudure en fonction du rayon de la source R dans des mêmes conditions.

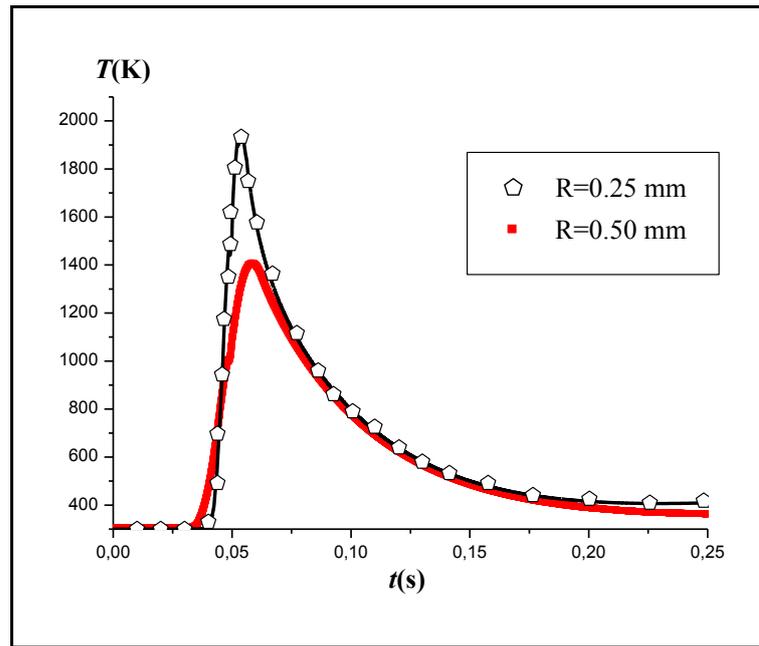


Figure III.12 : Profils des températures au centre du cordon de soudure pour $R=0.25$ mm et $R=0.50$ mm

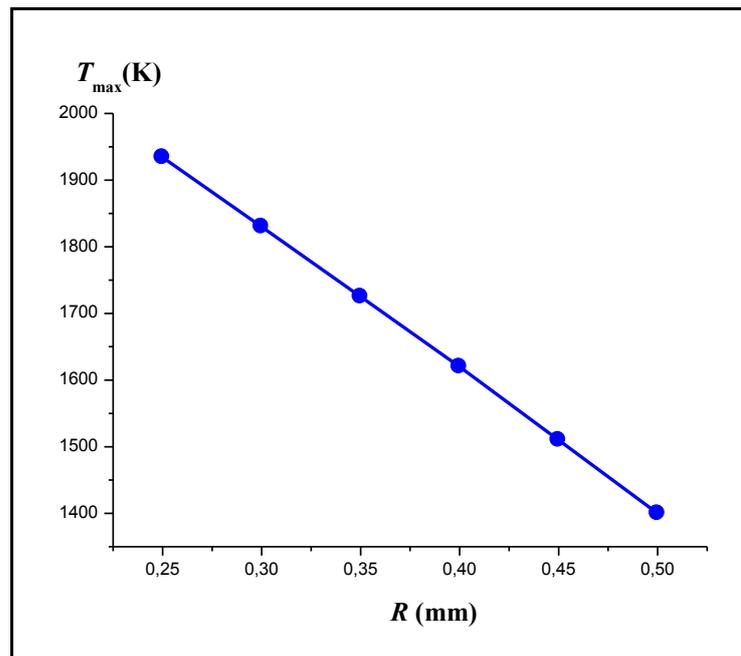


Figure III.13 : Températures maximales au centre du cordon de soudure en fonction du rayon de la source R

C'est clair que si R augmente, la température maximale diminue. Ce résultat est attendu puisque $Q \sim (1/R^2)$. La **figure III.13** montre une variation linéaire entre la température maximale T_{max} et le rayon de la source R dans les conditions de soudage et sur l'intervalle de R utilisé.

3. Etude des pertes d'énergie durant le soudage cas 2D

Afin de déterminer les pertes d'énergie dans le cas de l'étude 2D du comportement thermique des plaques métalliques lors des soudures, les pertes d'énergie par rayonnement et convection sont calculées pour des plaques en alliage de titane TA6V en fonction du temps, de la position x et du rayon R .

3.1. Influence des pertes d'énergie sur le calcul des températures

Pour déterminer l'influence des pertes sur les calculs, les températures sont calculées sur le cordon de soudure au point ($x = 0$ mm, $y = 2.5$ mm) pour $P = 2500$ W et $V = 0.040$ m/s avec et sans la considération des pertes. Les résultats sont reportés dans le **tableau III.8**. On peut noter que les variations de température $\Delta T/T$ ne dépassent pas 0.2 % après 0.20 s.

Tableau III.8 : Variations de température avec et sans perte d'énergie [122]

$t(\text{s})$	$T(\text{K})$ ($\sigma=0, h=0$)	$T_{\text{perte}}(\text{K})$ ($\sigma \neq 0, h \neq 0$)	$\Delta T/T_{\text{perte}}$ (10^{-2} %)
0	300	300	0.0
0.05	1542.840	1542.808	0.2074
0.10	524.6337	524.5176	2.2135
0.20	455.2927	454.6050	15.1274

3.2. Pertes par rayonnement et convection en fonction de t

Les pertes d'énergie par radiation et par convection en fonction du temps sont présentées sur les **figures III.14** et **III.15** pour $V = 0.060$ m/s et $P = 2500$ W. Nous avons remarqué que, pendant le soudage, l'énergie perdue par rayonnement ou convection varie en fonction du temps, et elle est plus élevée près du cordon de soudure. La valeur maximale de l'énergie perdue par rayonnement (environ 2.52×10^{-4} J) est plus grande que la valeur maximale de l'énergie perdue par convection (environ 1.67×10^{-4} J).

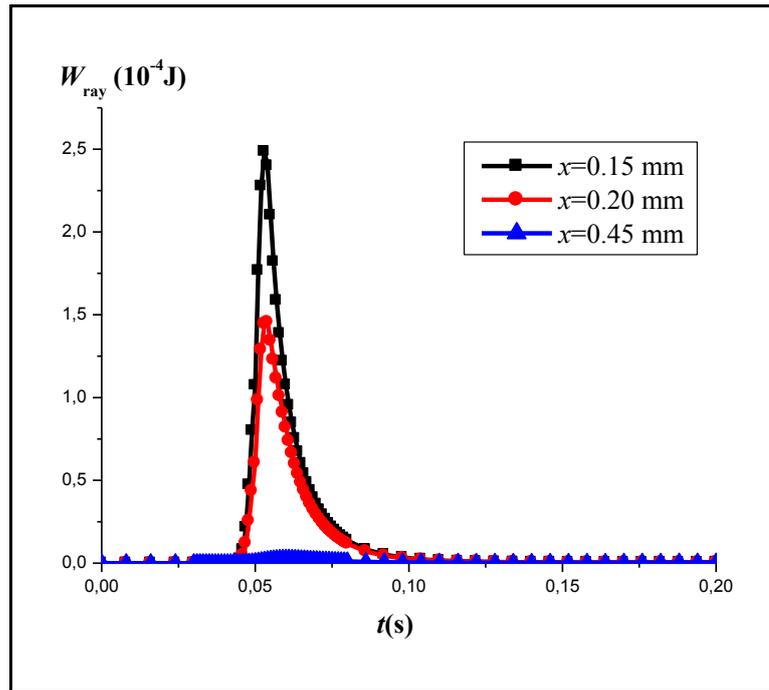


Figure III.14 : Pertes d'énergie par rayonnement en fonction de t pour différentes positions pour $V=0.060$ m/s et $P=2500$ W [122]

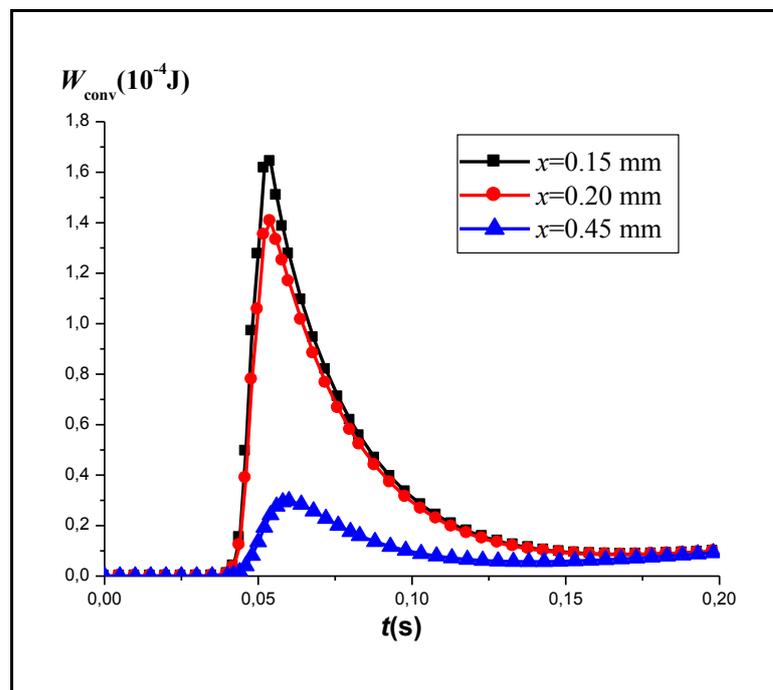


Figure III.15 : Pertes d'énergie par convection en fonction de t pour différentes positions pour $V=0.060$ m/s et $P=2500$ W [122]

Le profil de l'énergie perdue par rayonnement et convection est présenté sur les figures III.16, III.17 et III.18 respectivement pour les positions $x = 0.15$ mm, $x = 0.20$ mm et $x = 0.45$ mm. Ces résultats sont effectués pour $y = 2.75$ mm, $P = 2500$

W et $V = 0.060$ m/s. L'énergie perdue par rayonnement est inférieure à celle perdue par convection dans une durée de temps. Nous pouvons également constater que l'énergie perdue par rayonnement est aussi inférieure que l'énergie perdue par convection en s'éloignant du cordon de soudure. Il y a donc une compétition entre les deux phénomènes de rayonnement et de convection. Ces conclusions confirment l'hypothèse retenue par Belhadj et al. [28]; où ils ont supposé la perte d'énergie par rayonnement au niveau de la surface éclairée par faisceau laser.

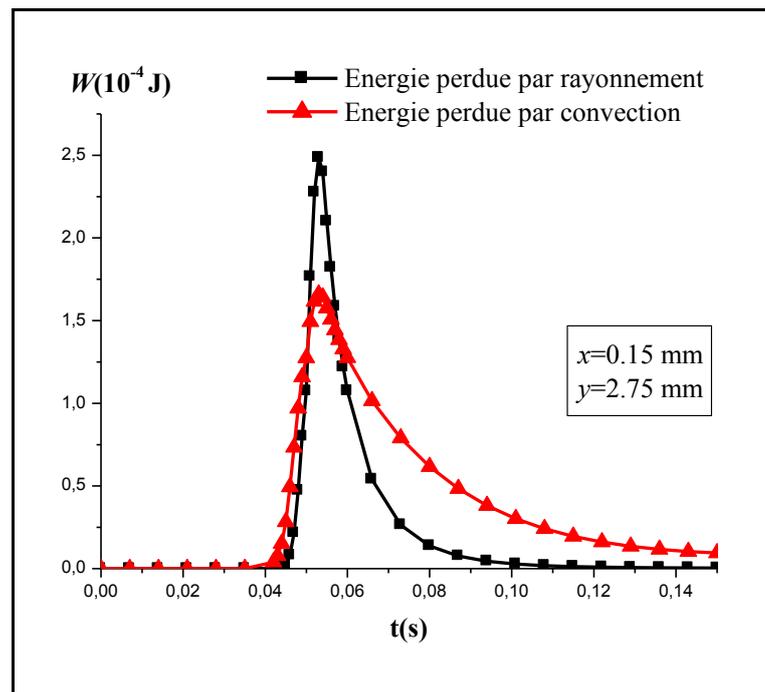


Figure III.16 : Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point $(x=0.15 \text{ mm}, y=2.75 \text{ mm})$

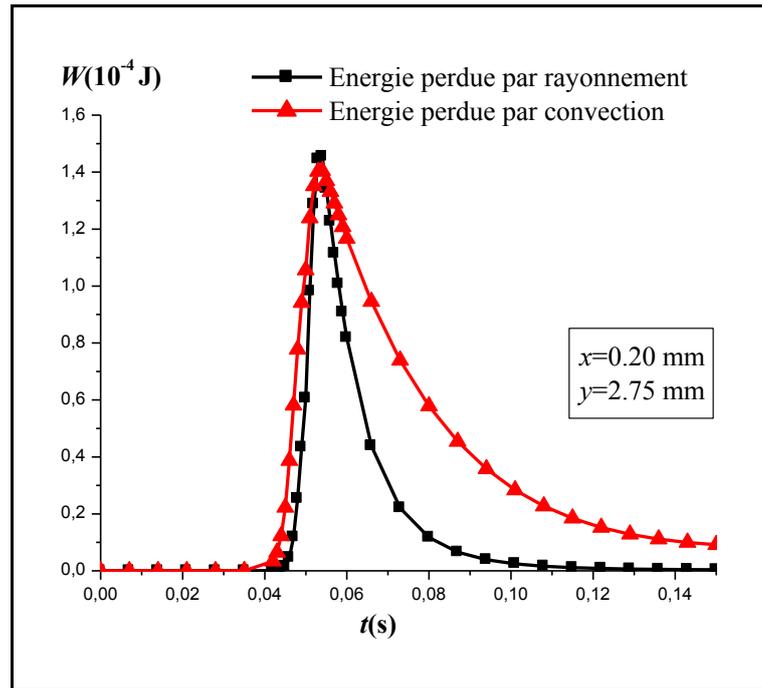


Figure III.17 : Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point ($x=0.20 \text{ mm}$, $y=2.75 \text{ mm}$)

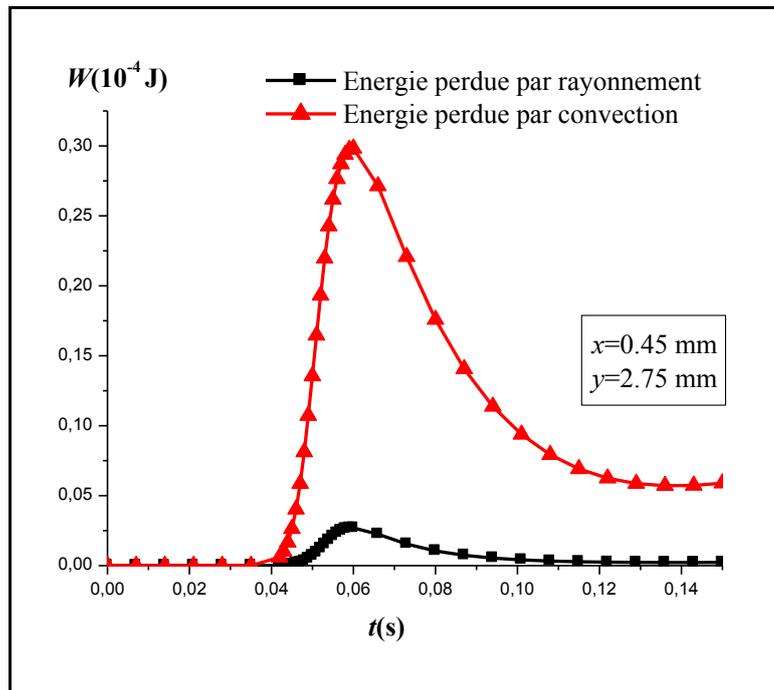


Figure III.18 : Pertes d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t au point ($x=0.45 \text{ mm}$, $y=2.75 \text{ mm}$)

3.3. Pertes par rayonnement et convection en fonction de x

La figure III.19 nous montre l'énergie totale perdue en fonction de x aux instants $t = 0.040 \text{ s}$ et $t = 0.045 \text{ s}$.

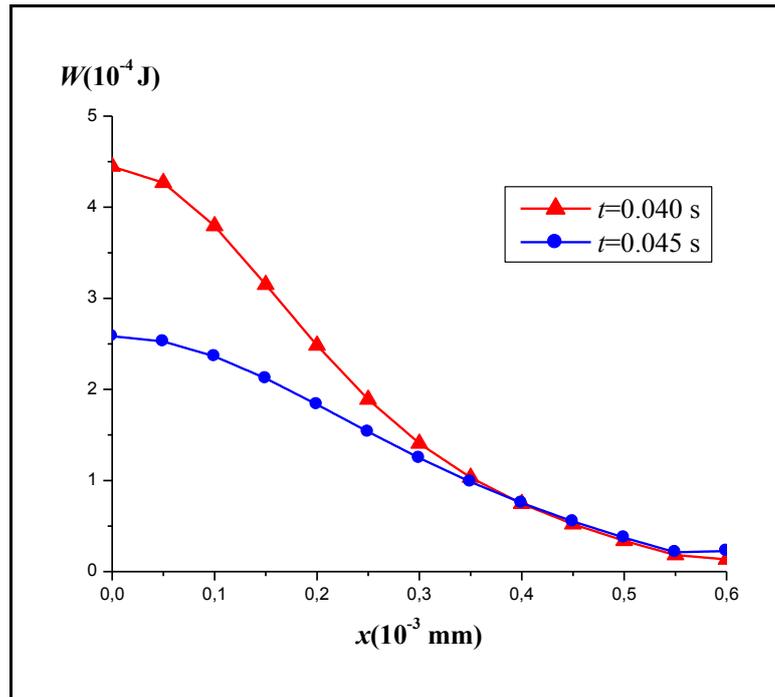


Figure III.19 : Pertes d'énergie en fonction de la position x pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s

Les pertes d'énergie pour différentes zones dans la plaque pendant le soudage (0.1 s) sont indiquées dans le **tableau III.9** pour $R = 0.30$ mm, $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s. Les résultats montrent que les pertes par unité de surface au niveau du cordon de soudure et près du cordon sont importantes. Par contre l'énergie totale perdue, surtout par convection, est la plus importante par rapport à l'énergie perdue par rayonnement sur toute la surface de la plaque.

Tableau III.9 : Pertes d'énergie durant le soudage pour une plaque [122]

Zones	Sur le cordon	Près du cordon	Sur le reste de la plaque
Surface (mm ²)	1.5	1.5	297.0
$W_{\text{ray}} + W_{\text{conv}}$ (10 ⁻² J)	4.8792	4.8507	840.4866
Pertes par unité de surface (J/ mm ²)	0.0325	0.0323	0.0283

L'énergie perdue en fonction de la position x pour différentes valeurs de puissance laser est illustrée sur la **figure III.20**. Nous remarquons que la valeur des pertes d'énergie diminue le long de x . À chaque moment, on peut constater que l'énergie perdue augmente lorsque la puissance du laser augmente. Il est clair que l'énergie perdue sur le cordon et près du cordon est supérieure à l'énergie perdue dans le reste de la plaque.

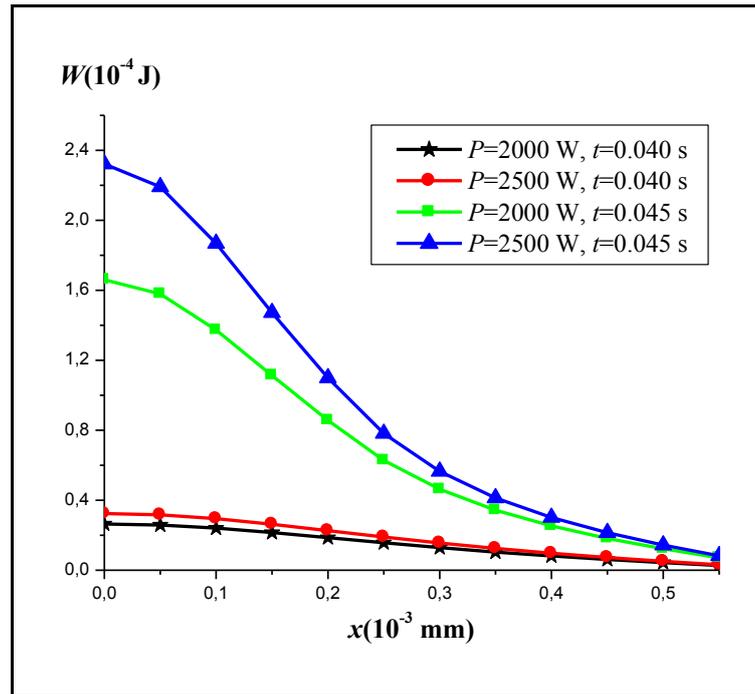


Figure III.20 : Pertes d'énergie en fonction de la position x pour différentes valeurs de puissance pour $y = 2.0 \text{ mm}$

Les températures peuvent atteindre la température β -transus sur le cordon de soudure et près du cordon de soudure. Donc, le calcul exact des températures dans ces positions est requis. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte les pertes d'énergie sur le cordon de soudure et près du cordon de soudure pour une description précise de la structure des matériaux lors des soudures.

La quantité d'énergie perdue par rayonnement et par convection par rapport à l'énergie totale fournie aux plaques de l'alliage TA6V est présentée sur le **tableau III.10**.

Tableau III.10 : Quantité d'énergie perdue par les deux plaques de TA6V

Quantité d'énergie perdue	Durée
2.5 %	0.10 s
7 %	0.20 s

Dans les conditions de soudage : ($P=2500 \text{ W}$, $V=0.040 \text{ m/s}$, et $R=0.030 \text{ m}$), les variations de température $\Delta T/T$ ne dépassent pas 0.2% après une durée de 0.20 s et la quantité d'énergie perdue par convection et rayonnement représente 7% du bilan énergétique. Dans un travail précédent de K. Abderrazak et al. [29], les pertes

par rayonnement et convection dans la zone de soudage d'un l'alliage de magnésium ont été estimées à environ 20 %, de la puissance du laser.

3.4. Pertes par rayonnement et convection en fonction de R

Pendant le soudage et pour deux plaques, les pertes sont calculées et présentées en fonction du rayon de la source d'énergie R sur la **figure 21**. C'est clair que lorsque R augmente les pertes diminuent de manière significative.

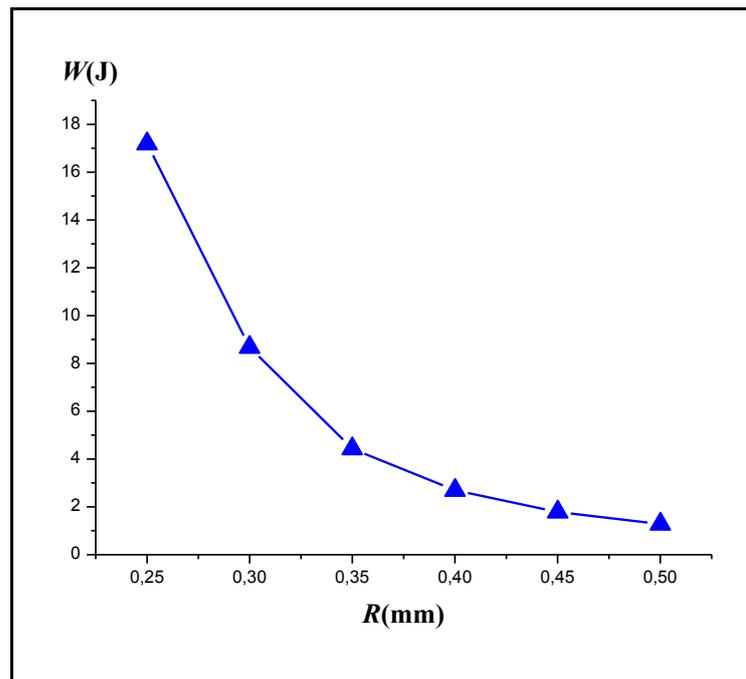


Figure III.21 : Pertes pour deux plaques en fonction du rayon de la source d'énergie

4. Étude 3D du comportement thermique des plaques métalliques soudées par laser

Les hypothèses utilisées dans le cas de l'étude 3D des plaques métalliques lors des soudures laser sont mentionnés dans la **section 5.2** du **chapitre II**. Nous allons présenter tout d'abord les résultats de l'étude 3D du comportement thermique des plaques minces. Ces résultats sont comparés avec celles de l'étude 2D. Une autre étude 3D, prévue être plus rationaliste pour les plaques épaisses, sera présentée par la suite.

4.1. Étude 3D du comportement thermique cas des plaques minces

Pour les plaques minces ($z < 5$ mm) de l'alliage de TA6V, les variations des températures sont calculées. Pour comparer l'étude 3D avec celle de 2D, des plaques de 3 mm d'épaisseur sont utilisées avec les mêmes conditions de soudage.

4.1.1. Profil des températures

Nous avons utilisé la formule du terme source de distribution gaussienne suivant l'équation (II.12) pour calculer les températures. La **figure III.22** présente les profils des températures sur le cordon ($x = 0.0$ mm et $z = 1.5$ mm) les résultats pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s pour différentes valeurs de y . Les profils montre une grande similitude entre les courbes, en profil et en intensité, indiquant l'homogénéité pour l'opération de soudure au niveau du cordon de soudure.

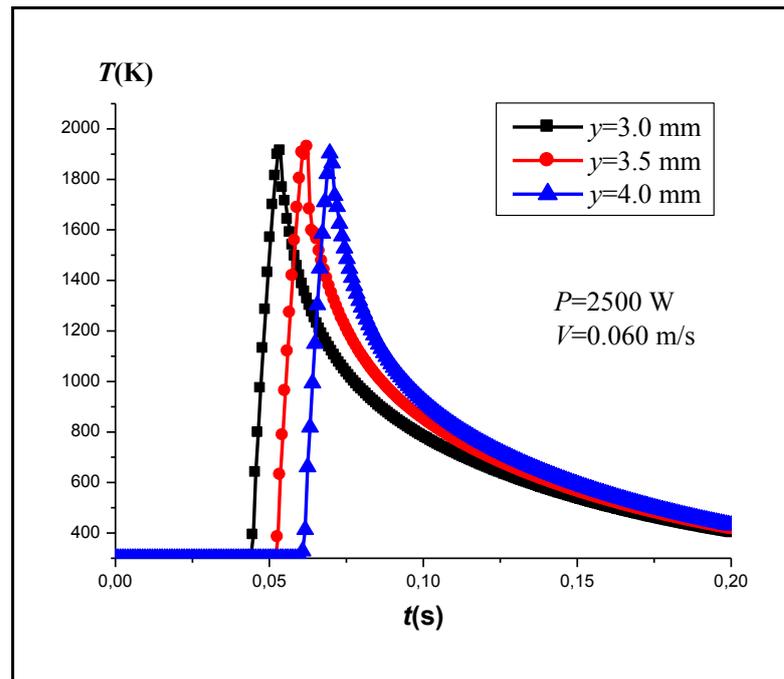


Figure III.22 : Profils des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure pour $P=2500$ et $V=0.060$ m/s

4.1.2. Comparaison entre l'étude 2D et 3D

Pour comparer les résultats des températures obtenues par les deux cas d'études 2D et 3D, les températures sont calculées pour les mêmes conditions de puissance et de vitesse ($P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s) pour un point choisi de la plaque ($x = 0.0$ mm, $y = 3.0$ mm) dans le cas 2D et ($x = 0.0$ mm, $y = 3.0$ mm, $z = 1.5$ mm) dans le cas 3D. La source utilisée dans le cas de 3D est celle définie par la formule (II.14). Les dimensions des plaques sont les mêmes et le temps de soudage de la plaque est 0.1 s dans les deux cas. Les résultats sont présentés sur la **figure III.23**.

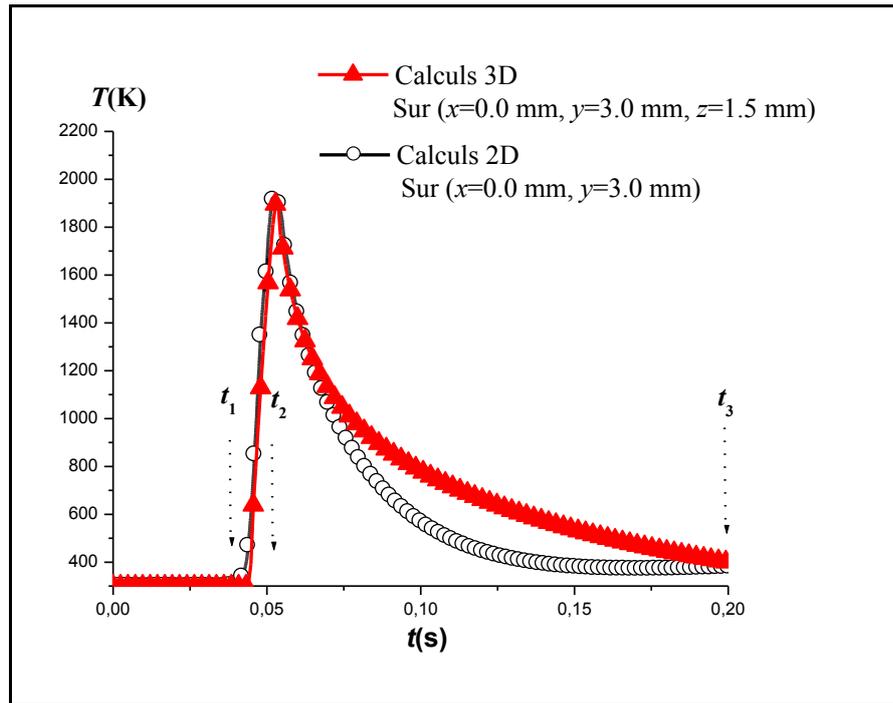


Figure III.23 : Comparaison des profils des températures obtenues par les deux cas d'études 2D et 3D pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s

Les profils sont presque identiques dès le début du soudage $t=0.0$ s jusqu'au $t = 0.07$ s. Ensuite on observe un écart jusqu'au $t = 0.18$ s. Après, les températures convergent vers une température de $T \approx 380$ K. Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont calculées dans les cas 2D et 3D pour les conditions de la **figure III.23** et présentées dans le **tableau III.11**.

Tableau III.11 : Comparaison des vitesses de chauffage et de refroidissement lors de soudage pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s

	T_{\max} (K)	t (s)	Vitesse de chauffage (K/s) entre $t_1=0.04$ s et $t_2=0.05$ s	Vitesse de refroidissement (K/s) entre $t_2=0.05$ s et $t_3=0.20$ s
Cas 2D	1913.995	0.0532	1.604×10^5	1.022×10^5
Cas 3D	1912.319	0.0536	1.612×10^5	1.009×10^5

On peut remarquer d'abord que les températures maximales atteintes ainsi que les instants correspondants sont proches dans les deux cas. La comparaison entre les vitesses de chauffage et de refroidissement dans les résultats de 3D par rapport aux résultats de 2D présente une augmentation de 0.5 % au niveau de la période de chauffage entre $t_1 = 0.04$ s et $t_2 = 0.05$ s et une diminution de 1.3 % au niveau de la période de refroidissement $t_2 = 0.05$ s et $t_3 = 0.20$ s.

4.2. Étude 3D du comportement thermique cas des plaques épaisses

4.2.1. Sources d'énergie

Nous avons choisi les formules (II.11) et (II.12), décrit dans la section 5.1 du chapitre II, pour décrire la source d'énergie au niveau de la plaque. Ces deux sources sont nommées source1 et source2 et définies comme suit :

- **Source 1** : $Q_1(x, y, z)$ est une source avec une distribution gaussienne volumique, calculée selon la formule de l'équation (II.13). Avec les paramètres suivantes :

$a = d/2$, $b = d$ et $c = Z_{\max}/2$, un exemple sur la variation de la source en fonction de z est présenté sur la figure III.24. Par la suite, le profil de la source au niveau de Z_{\max} en fonction de x est présenté sur la figure III.25 pour différentes valeurs de y .

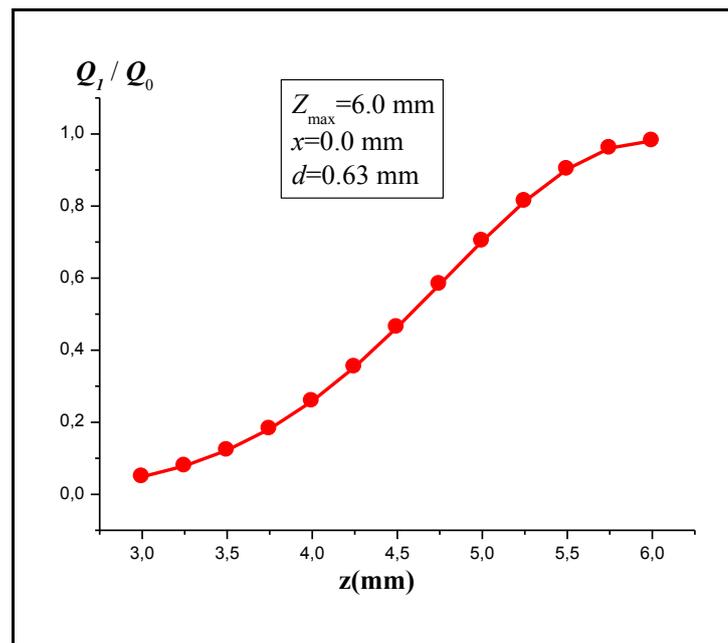


Figure III.24 : Variation de la source 1 en fonction de z

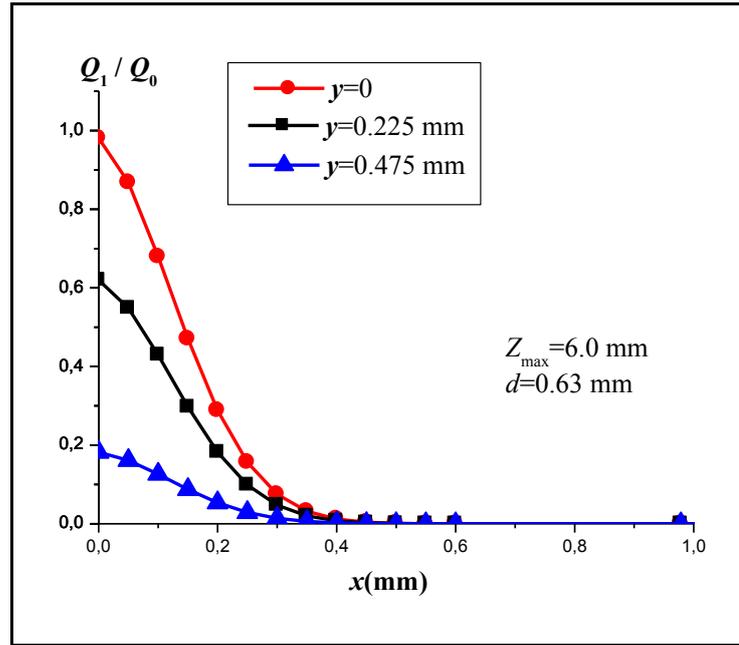


Figure III.25 : Profil de la source 1 au niveau de Z_{\max} en fonction de x pour différentes valeurs de y

• **Source 2** : $Q_2(r, z)$ est une source de forme conique suivant une distribution gaussienne de chaleur, calculé selon la formule de l'équation (II.14). Une variation est supposée linéaire du rayon de la source en fonction de z . La figure III.26 présente la variation de la source $Q_2(r, z)$ en fonction de z . Le profil de $Q_2(r, z)$ en fonction de x au niveau de Z_{\max} est présenté sur la figure III.27.

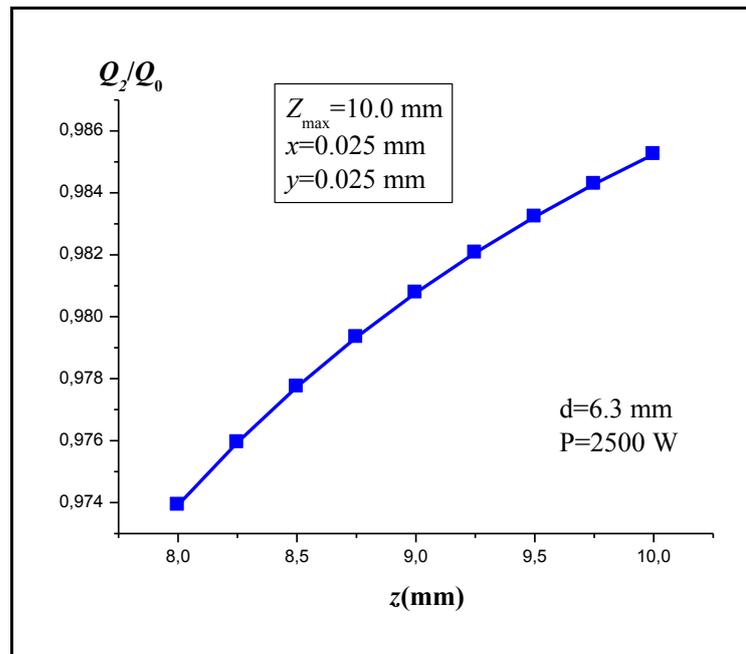


Figure III.26 : Variation de la source 2 en fonction de z

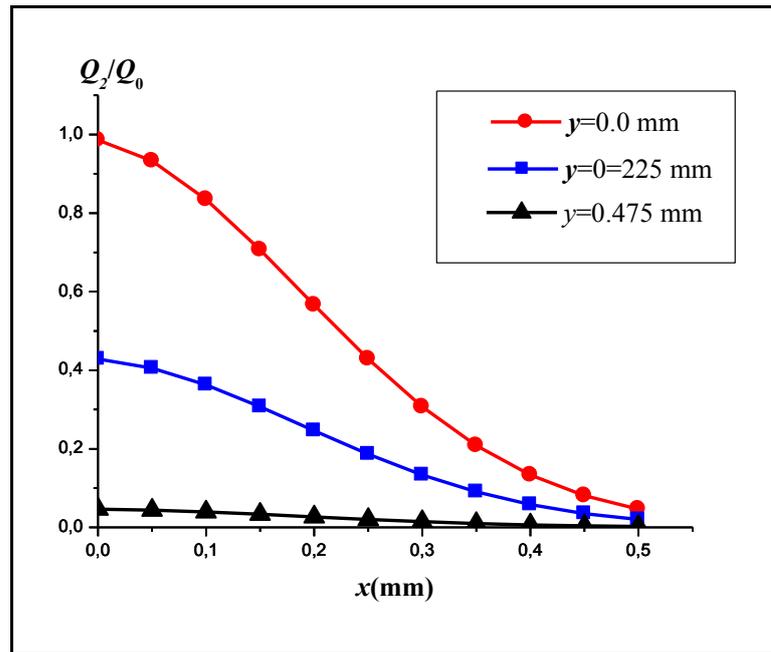


Figure III.27 : Profil de la source 2 au niveau de Z_{\max} en fonction de x

Les figures III.28 et III.29 présentent les variations des températures pour les deux formes de source en fonction du temps sur le cordon de soudure ($x = 0.0$ mm et $z = Z_{\max}$). Les conditions utilisées dans les deux cas sont les mêmes ($P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s).

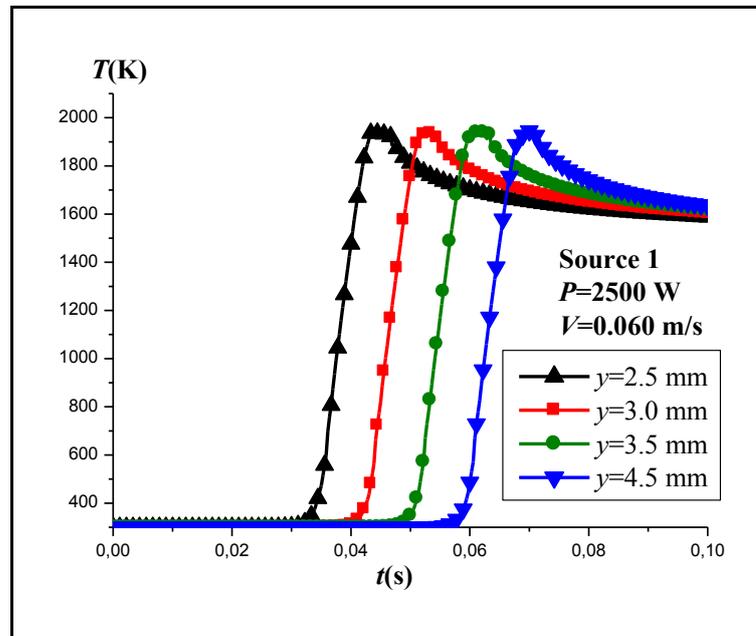


Figure III.28 : Variations des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s en utilisant la source 1

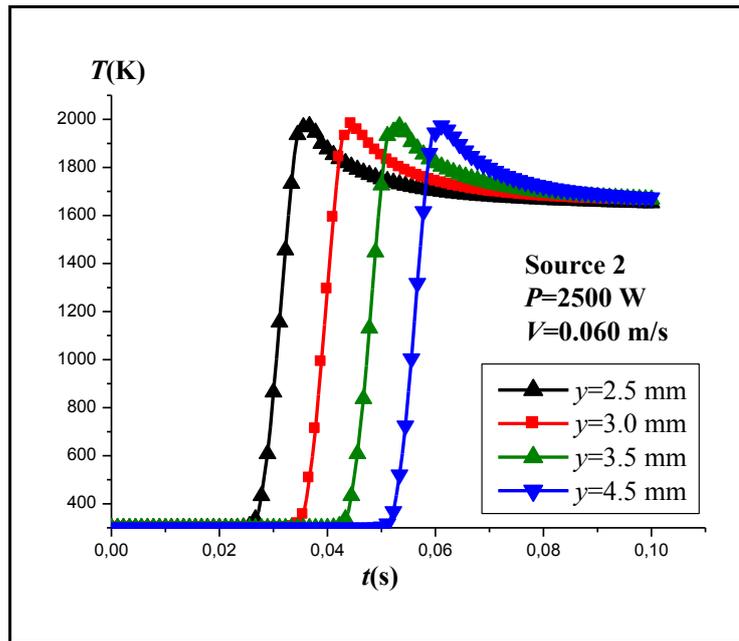


Figure III.29 : Variations des températures en fonction du temps sur le cordon de soudure $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s en utilisant la source 2

Pour faire une comparaison entre les deux sources, les profils des températures en utilisant les deux formules de source au niveau du point ($x = 0.0$ mm, $y = 3.5$ mm) sur $z = Z_{max}$ pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s sont présentés sur la **figure III.30**. Les deux profils sont presque identiques.

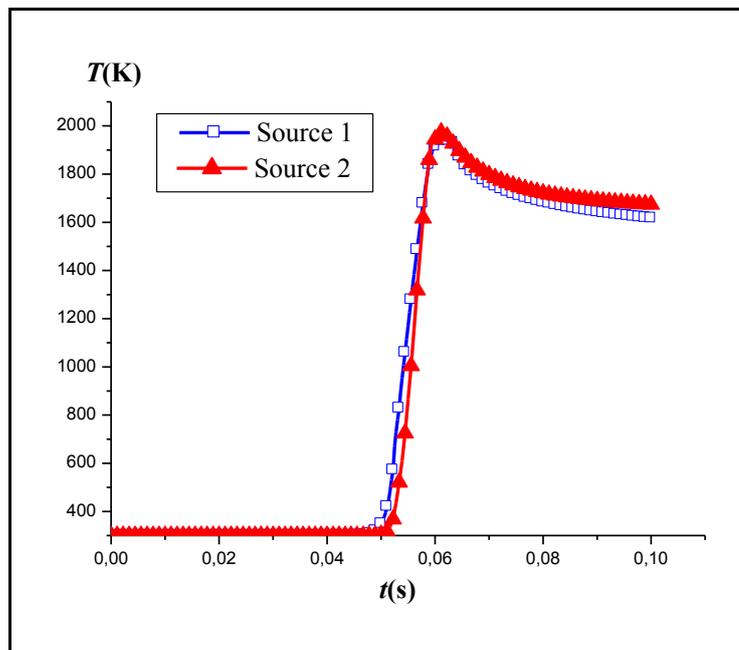


Figure III.30 : Profils des températures pour les deux formes de source au point ($x=0.0$ mm, $y=3.5$ mm, $z=Z_{max}$) pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s

Les figures précédentes (III.28 et III.29) montrent aussi une grande similitude entre les courbes, en profil et en intensité, indiquant l'homogénéité pour l'opération de soudure au niveau du cordon de soudure. La source conique suivant la formule (II.14) a été utilisé pour étudier le comportement thermique des plaques en TA6V soudées par laser afin de déterminer les variations des températures en fonction du temps et de position et ensuite de calculer les pertes d'énergie par rayonnement et convection.

4.2.2. Profils des températures en fonction du temps

Dans l'étude 3D du comportement thermique cas des plaques épaisses, les dimensions utilisées sont : $X_{\max}=20$ mm, $Y_{\max}=6$ mm et $Z_{\max}=10$ mm. Les dimensions de la source sont choisies comme celles dans le travail de 2D et la profondeur selon des observations expérimentales de J. Ahn et al. en 2016 [82]. La durée de soudure de la plaque est 0.1s si la vitesse est de 0.060 m/s. Les conditions $P = 2000-3000$ W et $V = 0.040-0.060$ m/s sont choisies pour les calculs, sous ces conditions le cordon de soudure atteint le point de fusion du TA6V Dans la suite, Les profils des températures qui présentent l'évolution de la température dans la plaque en fonction du temps et de position seront présentés. La figure III.31 présente les variations des températures en fonction du temps et en fonction de y pour une puissance de 2500W et une vitesse de 0.060 m/s.

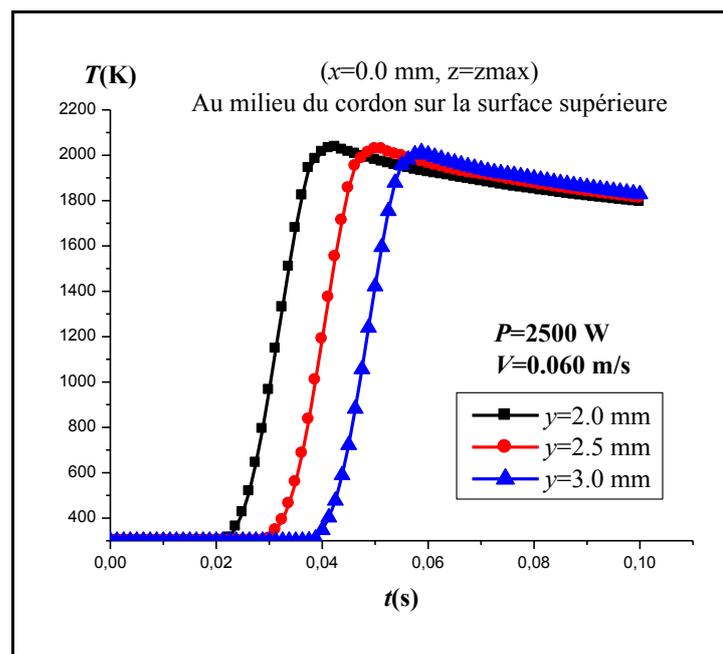


Figure III. 31 : Variations des températures en fonction du temps sur la surface supérieure du cordon de soudure pour $P=2500$ W et $V=0.060$ m/s

Les variations des températures pour différentes valeurs de y près du cordon de soudure sont présentées sur la **figure III.32** pour $P = 2500\text{W}$ et $V = 0.060\text{ m/s}$. La **figure III.33** présente les variations des températures pour $x = 2.5\text{ mm}$ et $x = 5.5\text{ mm}$ sur la face supérieure et pour $y = 2.5\text{ mm}$ sous les conditions $P = 2500\text{W}$ et $V = 0.060\text{ m/s}$.

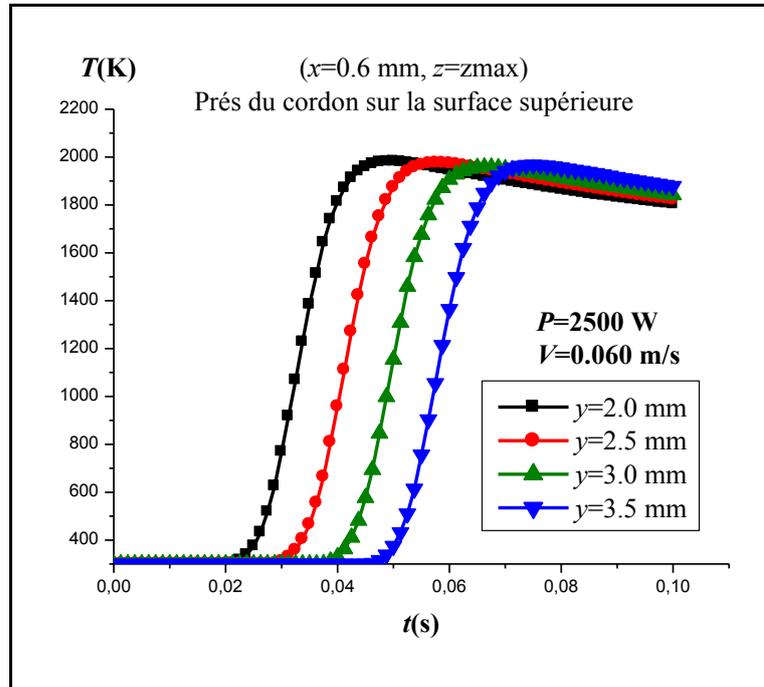


Figure III 32 : Variations des températures en fonction du temps près du cordon de soudure pour $P= 2500\text{ W}$ et $V= 0.060\text{ m/s}$

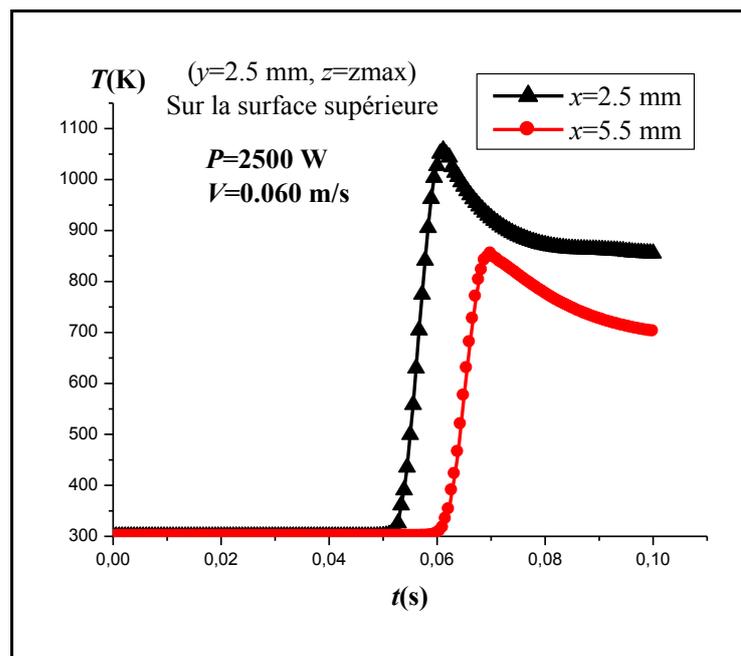


Figure III 33 : Variations des températures en fonction du temps sur la surface supérieure pour $x=2.5\text{ mm}$ et $x= 5.5\text{ mm}$

En s'éloignant du cordon de soudure, la température maximale atteinte diminue. En plus, la température maximale est atteinte après un temps plus long pour un point loin de la source. Les variations des températures en fonction du temps sont présentées sur la **figure III.34** pour $x=0.0$ mm et $y = 2.5$ mm pour $z = 7.5$ mm, $z= 7.25$ mm et $z = 7.0$ mm et pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s.

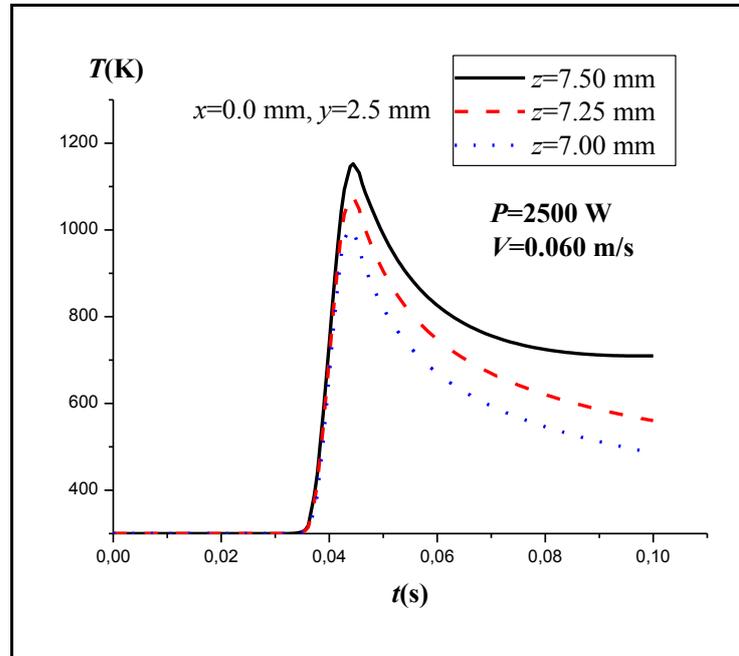


Figure III.34 : Variations des températures en fonction du temps pour $z=7.50$ mm $z=7.25$ mm et $z=7.00$ mm

La source est supposée distribuée sur une profondeur de 2.0 mm (suivant le repère choisi : pour $8.0 \text{ mm} \leq z \leq 10 \text{ mm}$) On note qu'il existe une distribution de température suivant des profondeurs >2.0 mm. L'influence de la puissance et de la vitesse de soudage sur les températures au niveau de la profondeur va être présentée dans les sections suivantes.

4.2.3. Profil des températures pour différentes valeurs de vitesse

Afin d'étudier l'influence des vitesses de soudage sur les variations des températures, les températures en fonction du temps sont calculées pour une puissance de 2500W et différentes valeurs de vitesse, l'évolution des températures au point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm) est présentée sur la **figure III.35**.

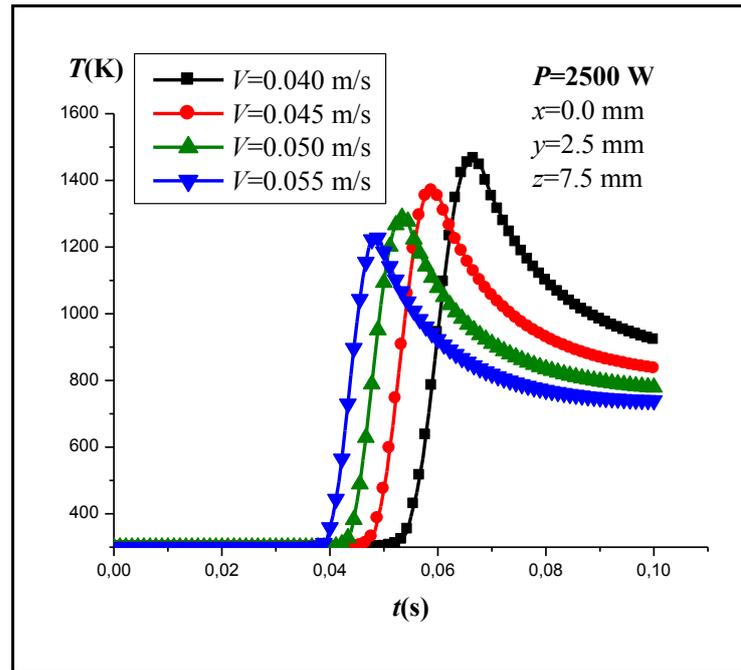


Figure III.35: Évolution des températures pour $P=2500$ W et différentes valeurs de vitesse au point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)

Les températures maximales ainsi que les instants correspondants sont présentés sur le **tableau III.12**.

Tableau III.12 : Températures maximales atteintes pour $P=2500$ W et différentes vitesses

V (m/s)	T_{\max} (K)	t (s)
0.040	1468.150	0.066
0.045	1370.366	0.058
0.050	1290.517	0.054
0.055	1227.630	0.049
0.060	1152.361	0.040

Ces résultats montrent que si la vitesse de soudage augmente les températures diminuent. D'autre part, pour que la température atteigne son maximum un écart de temps est remarqué pour les différentes vitesses. Cette relation entre les températures et les vitesses de soudage est valable pour tout point dans la plaque. Des exemples sont présentés sur les **figures III.36** et **III.37**. L'évolution des températures pour le point ($x = 0.6$ mm, $y = 2.0$ mm, $z = 4.5$ mm) est présenté sur la **figure III.36** pour $P = 2000$ W et deux différentes valeurs de vitesses. La **figure III.37** montre l'évolution des températures pour le point $x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm et $z = 5.5$ mm pour $P = 2000$ W et deux différentes valeurs de vitesse.

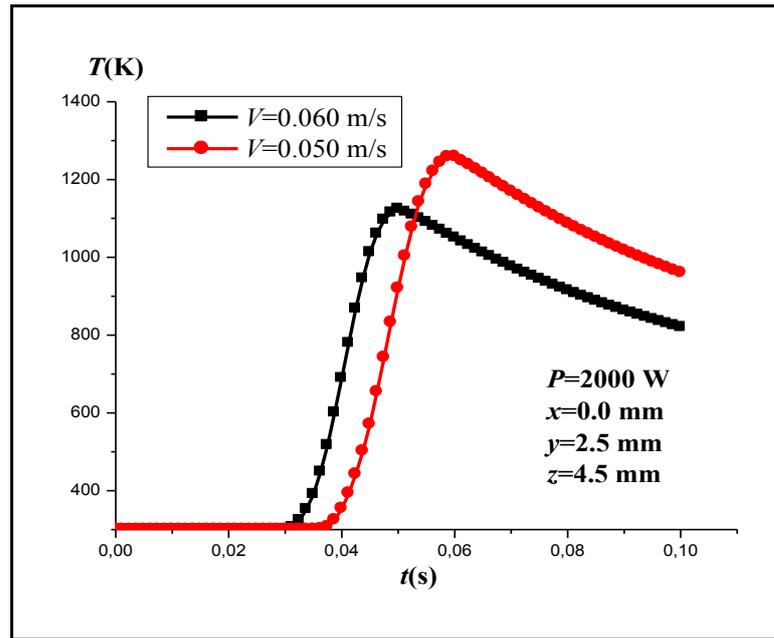


Figure III.36 : Évolution des températures pour deux différentes valeurs de vitesse au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm et $z=4.5$ mm)

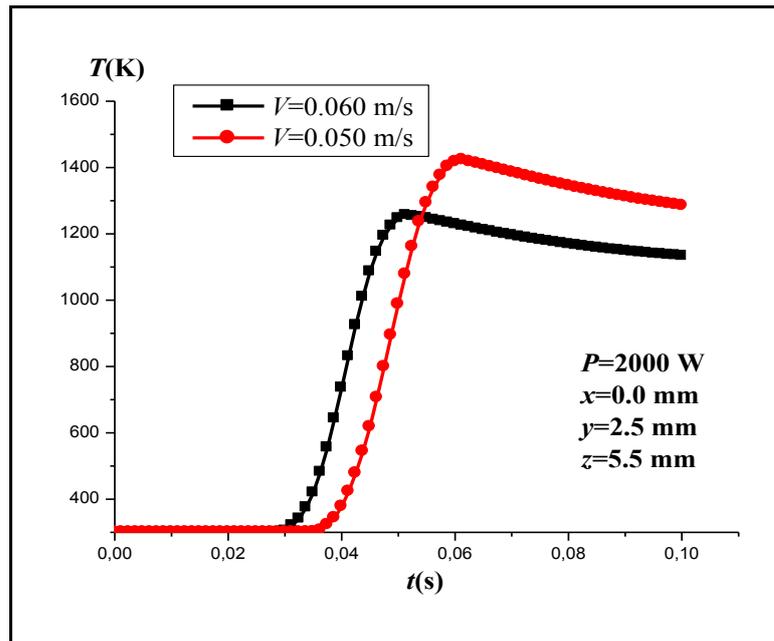


Figure III.37: Évolution des températures pour deux différentes valeurs de vitesse au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm, $z=5.5$ mm)

4.2.4. Profil des températures pour différentes valeurs de puissance

Afin d'étudier l'influence des puissances sur les variations des températures, les températures en fonction du temps sont calculées pour une vitesse de 0.050 m/s et pour différentes valeurs de puissance dans différentes positions dans la plaque. L'évolution des températures sur le point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm) est présentée sur la **figure III.38**.

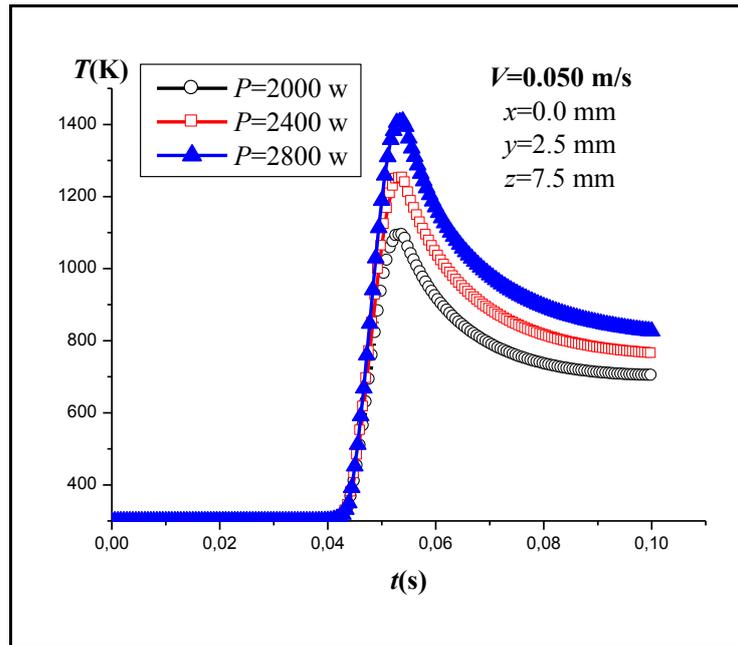


Figure III.38 : Évolution des températures pour $V=0.050$ m/s et différentes valeurs de puissances au point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)

Les valeurs des températures maximales ainsi que les instants correspondants pour différentes valeurs de puissance entre 2000 W et 2800 W sont présentées dans le **tableau III.13**.

Tableau III.13 : Températures maximales atteintes pour $V=0.050$ m/s et différentes valeurs de puissances sur le point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 7.5$ mm)

$P(W)$	$T_{max}(K)$	$t(s)$
2000	1092.589	0.0539
2200	1171.766	0.0539
2400	1250.939	0.0539
2600	1330.094	0.0539
2800	1409.248	0.0539

Ces résultats montrent d'un côté, que si la puissance augmente les températures sont plus grandes. D'un autre, pour la même vitesse de soudage V , pour différentes puissance P et en un point donné du cordon, les températures maximales sont atteintes pratiquement au même moment. Cette relation entre les températures et les puissances est valable pour tout point dans la plaque.

Des exemples sont présentés sur les figures **III.39** et **III.40**. L'évolution des températures sur le point ($x = 0.6$ mm, $y = 2.0$ mm, $z = Z_{max}$) est présenté sur la **figure III.39** pour $V = 0.060$ m/s et pour différentes valeurs de puissance. Pour

le point ($x = 0.0$ mm, $y = 2.5$ mm, $z = 4.5$ mm), l'évolution des températures est présentée sur la **figure III.40** pour $V = 0.060$ m/s et pour deux différentes valeurs de puissance.

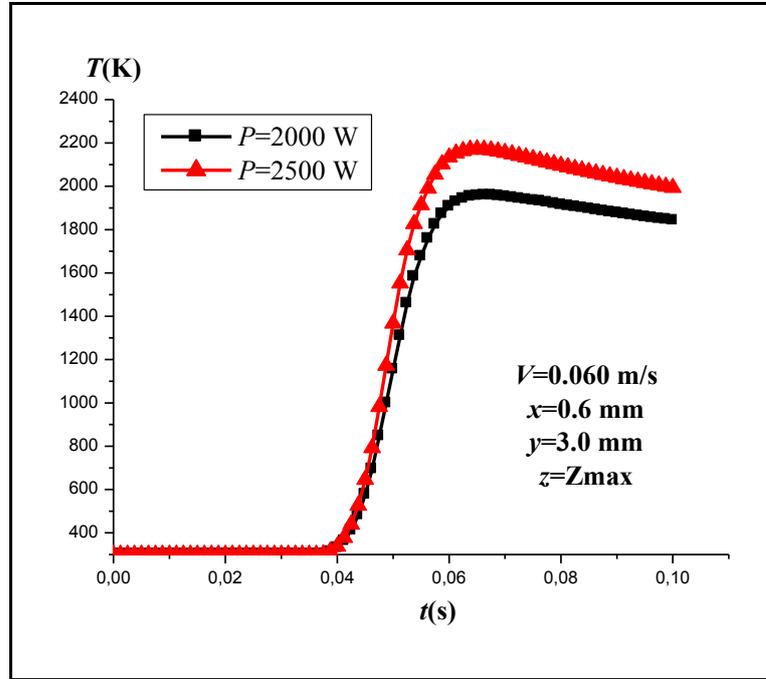


Figure III.39: Évolution des températures pour $V=0.060$ m/s et pour deux différentes valeurs de puissance au point ($x=0.6$ mm, $y=3.0$ mm, $z=Z_{max}$)

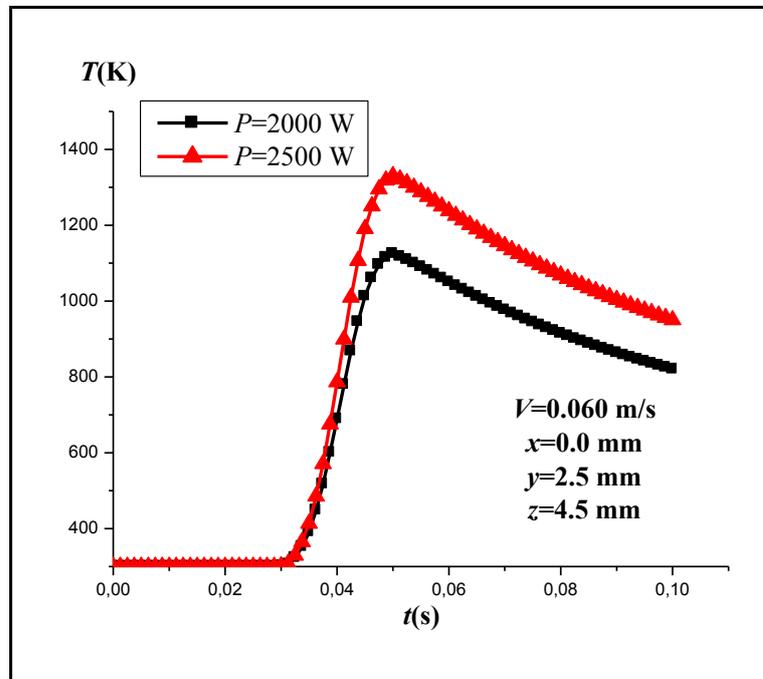


Figure III.40 : Évolution des températures pour $V = 0.060$ m/s et deux différentes valeurs de puissance au point ($x=0.0$ mm, $y=2.5$ mm, $z=4.5$ mm)

5. Détermination des pertes d'énergie durant le soudage cas 3D

Les pertes d'énergie par rayonnement et par convection sont calculées lors du soudage laser des plaques épaisses en alliage de titane TA6V de dimensions ($X_{\max} = 20$ mm, $Y_{\max} = 6$ mm, $Z_{\max} = 10$ mm). La **figure III.41** présente l'énergie perdue par rayonnement et par convection en fonction du temps sur deux différentes positions par rapport au cordon de soudure position.

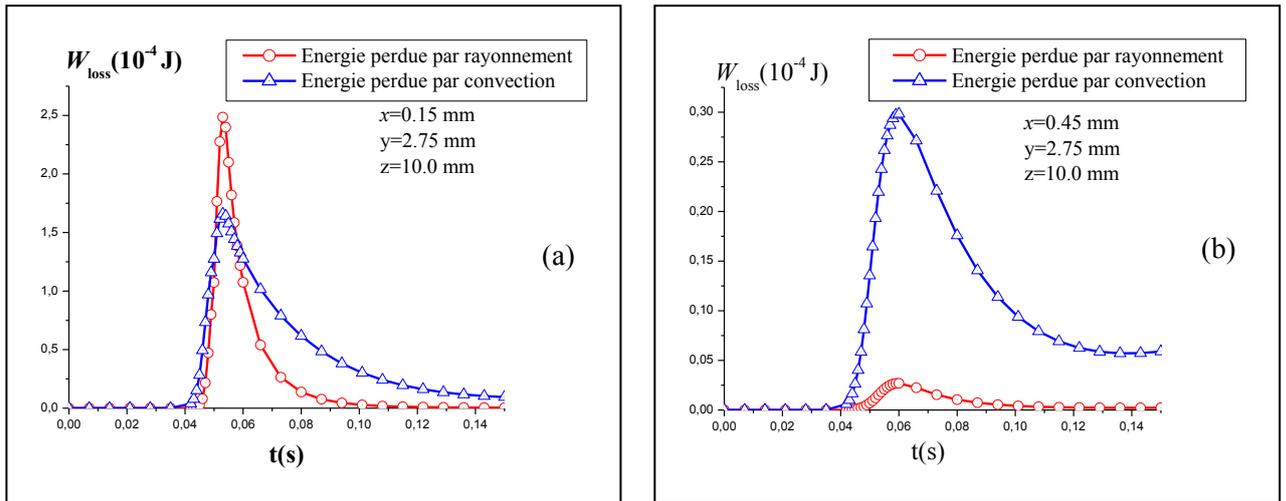


Figure III.41 : Perte d'énergie par rayonnement et par convection en fonction de t
(a) : Près du cordon, (b) : Loin du cordon

L'énergie perdue par rayonnement et par convection varie en fonction du temps, et elle est plus élevée près du cordon. Les résultats montrent que les pertes par rayonnement au niveau du cordon de soudure et près du cordon sont importantes. Par contre l'énergie totale perdue, surtout par convection, est la plus importante par rapport à l'énergie perdue par rayonnement sur toute la surface de la plaque. En utilisant une puissance de $P = 2500$ W et une vitesse de $V = 0.060$ m/s, la quantité d'énergie perdue par les deux plaques durant 0.1 s présente 12 % de la puissance du laser pour les conditions de soudage. La différence entre les résultats des études 2D et 3D est probablement due à plusieurs paramètres, tel que le taux de refroidissement ou les modèles de calcul.

Conclusion générale et perspectives

« Allez doucement, n'empêche pas d'arriver. »
Proverbe africain

Conclusion générale et perspectives

La compréhension des phénomènes physiques intervenant lors des procédés de soudage est un sujet de recherche d'actualité. La maîtrise et le contrôle des procédés de soudage des métaux nécessitent la compréhension de quelques notions comme la source d'énergie, le comportement thermique et l'état des cordons de soudure obtenus.

L'objet de cette thèse est de contribuer dans ce domaine par une étude numérique du soudage des alliages métalliques utilisés dans plusieurs domaines industriels. L'étude numérique réalisée s'intéresse au comportement thermique des plaques en alliage de titane TA6V ou de magnésium AM60, soudées par laser. Les pertes d'énergie par rayonnement et convection sont considérées et introduit dans les calculs.

Le **chapitre I** présente les principaux éléments bibliographiques relatifs aux principaux thèmes abordés.

Dans le **chapitre II**, intégralement consacré à la présentation de la modélisation numérique, nous avons présenté les équations et les méthodes numériques utilisées pour la résolution ainsi que les propriétés des alliages utilisées dans ce travail. Nous avons proposé une modélisation 2D spatiale et une autre modélisation 3D spatiale pour l'étude des plaques minces et épaisses. L'étude s'appuie sur la résolution de l'équation de l'énergie avec une source d'énergie qui dépend du temps et de l'espace. Le terme source est représenté par des sources de chaleurs mobiles surfacique et volumique. Ces sources sont définies suivant les caractéristiques du faisceau laser et les paramètres du soudage déterminés par des études expérimentales antérieures. Les changements d'état solide/liquide sont pris en compte en comparant le flux d'énergie et l'enthalpie de fusion et en supposant une variation linéaire de température. Les propriétés physiques des alliages, qui varient généralement en fonction de la température, sont considérées en fonction de l'état de la matière. La Méthode des Différences Finies est utilisé pour la résolution des équations avec un maillage irrégulier et un choix adéquat

des conditions aux limites. Les schémas généraux des organigrammes de calculs sont présentés.

Le **chapitre III** est consacré aux résultats numériques obtenus. Nous avons commencé par la présentation des profils des températures des plaques lors du soudage en fonction du temps et de position. Afin de juger la validité des résultats obtenus numériquement, ces derniers sont comparés à des résultats expérimentaux issus de quelques travaux publiés. Une étude paramétrique est effectuée pour étudier l'influence de quelques paramètres de soudage (principalement la vitesse de soudage et la puissance) sur le comportement thermique des plaques.

Les résultats du comportement thermique sont présentés sous forme d'évolution de la température en fonction du temps dès le début du soudage jusqu'au refroidissement. Les conditions de soudage appropriées obtenus à partir des résultats numériques sont comparées avec les données expérimentales publiées précédemment. Les conditions de soudage des plaques en alliage de titane TA6V sont $P = 2000-2500$ W et $V = 0.040- 0.065$ m/s, ces conditions sont en bon accord avec les résultats expérimentaux de F. Caiazzo et al. en 2003 [64] et J. Ahn et al. en 2016 [82]. Pour des plaques en alliage de magnésium les conditions de soudage appropriées sont $P = 2500-3000$ W et $V = 0.050- 0.060$ m/s, ces conditions sont en accord avec les résultats expérimentaux de A. Belhadj [66].

Les principales conclusions issues de l'étude du comportement thermique sont résumées comme suit :

- Au niveau du cordon, les vitesses de chauffage et de refroidissement prennent des valeurs plus grandes par rapport au reste de la plaque. Elles dépassent respectivement 22×10^4 K/s et -8.8×10^4 K/s cas de l'alliage TA6V pour $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s.
- Les évolutions des températures produites par différentes vitesses et différentes puissances de soudage ont montré des tendances similaires.
- En diminuant la vitesse de soudage, les températures augmentent et les températures maximales sont atteintes dans des instants différents. Par contre, lorsque la puissance augmente, les températures augmentent et les températures maximales sont atteintes dans un même instant.

- Les températures peuvent atteindre la température β -transus sur le cordon de soudure et près du cordon de soudure. Donc, le calcul exact des températures dans ces positions est requis.

Les résultats de l'étude du comportement thermique ont permis de déterminer les pertes d'énergie par rayonnement et par convection durant le soudage. Les principales conclusions sont :

- L'énergie perdue par rayonnement et par convection dépend de la position et de la puissance, ainsi que de la vitesse et du temps de soudage.
- À chaque moment, l'énergie perdue augmente lorsque la puissance du laser augmente et elle diminue lorsque la vitesse du laser augmente.
- Les pertes d'énergie par unité de surface au niveau du cordon de soudure et près du cordon sont importantes. Par contre l'énergie totale perdue, surtout par convection, est la plus importante par rapport à l'énergie perdue par rayonnement sur toute la surface de la plaque. Il y a donc une certaine compétition entre les deux phénomènes de rayonnement et de convection
- Il est nécessaire donc de prendre en compte les pertes d'énergie sur le cordon de soudure et près du cordon de soudure pour une description précise de la structure des soudures et pour améliorer l'efficacité du soudage au laser.
- Dans les conditions de soudage utilisées pour l'alliage de titane TA6V ($R = 0.30$ mm, $P = 2500$ W et $V = 0.060$ m/s), les variations de température $\Delta T/T$ ne dépassent pas 0.2 % après une durée de 0.20 s et la quantité d'énergie perdue par rayonnement et par convection représente de 7 à 12 % du bilan énergétique. Dans un travail précédent, celui de K. Abderrazak et al. [29], les pertes ont été estimées à environ 20 %, de la puissance du laser. Cette différence est probablement due à plusieurs paramètres tels que les propriétés physiques, les paramètres de soudage, le taux de refroidissement ou les modèles de calcul

À l'issue de ce travail, nous présentons quelques observations et perspectives :

- La démarche employée dans cette thèse peut être valable quel que soit le procédé de soudage ou le matériau utilisé ;

- Le développement de modèles numériques pour des soudures asymétriques est une perspective intéressante ;
- Il serait intéressant d'étudier l'effet de la vaporisation du métal sur les surfaces soudées. De plus, il serait intéressant aussi d'étudier exactement comment l'énergie perdue affecte les structures matérielles. Ces dernières nécessitent un calcul du volume des matériaux, à l'intérieur et à proximité du cordon de soudure, avec une formulation appropriée de la puissance du laser.

Annexes

Annexe 1

Propriétés physiques de quelques métaux [127,128]

Propriétés	Titane (99.9%)	Magnésium (99.98%)	Fer (99.9%)	Aluminium (99.996%)	Cuivre (99.95%)
Nombre atomique	22	12	26	13	29
Masse atomique (C12)	47.90	24.312	55.85	26.98	63.54
Densité (10^3 kg/m^3) à 20°C	4.511	1.743	7.861	2.712	8.941
Point de fusion (°C)	1668±10	650	1536.5±1	660.2	1083±0.1
Température de transformation (°C)	885 ^(a)	/	910 ^(b)	/	/
Conductivité thermique (W/mK) (à température ambiante)	15.57	96.86	79.56	202.36	390.88
Chaleur spécifique (kJ/kgK) à 20°C	0.528	1.030	0.448	0.900	0.385
Susceptibilité magnétique ^(c)	para	para	ferro	para	dia
Dilatation thermique (10^{-6} cm/K)	11.86	35.56	17.27	33.27	23.88
Résistivité électrique ($10^{-7} \text{ } \Omega \text{ m}$)	4.78	0.46	1	0.282	0.1724

(a) Le titane est HCP à $T < 885 \text{ }^\circ\text{C}$ et BCC à $T > 885 \text{ }^\circ\text{C}$

(b) Le fer est BCC à $T < 910 \text{ }^\circ\text{C}$ et FCC entre 910 et 1390,5 ° C

(c) Paramagnétique: légèrement plus perméable qu'un vide et indépendante de la force
Diamagnétique: moins perméable qu'un vide et faiblement repoussé par la force
magnétique.

Ferromagnétique: fortement magnétique et dépendant de la force magnétisante

Annexe 2 :

Alliages de titane : Catégories et composition chimique [57, 123]

Il existe trois grandes familles d'alliages de titane selon leurs proportions de phase retenues à la température ambiante :

1. Les alliages α

Les alliages α sont des alliages 100% α à température ambiante. Grâce à leur structure quasiment monophasée à température ambiante, ces alliages ont une bonne soudabilité. Ils ont une résistance mécanique moyenne. Leurs propriétés mécaniques sont plus faibles que celles des autres catégories d'alliages. Le titane pur fait partie de cette catégorie.

2. Les alliages $\alpha+\beta$

Les alliages $\alpha + \beta$ sont des alliages contiennent à la fois de la phase α et de la phase β . On distingue trois catégories parmi ces alliages :

- les alliages quasi- α qui ont peu de phase β stable (environ 2%)
- les alliages $\alpha + \beta$ (alliages biphasés) qui contiennent entre 5 et 20% de phase β . On trouve ici l'alliage Ti-6Al-4V (TA6V), très utilisé dans l'aéronautique, il possède un bon rapport résistance mécanique/ductilité.
- les alliages β métastables ont une capacité à retenir 100% de la phase β métastable à température ambiante.

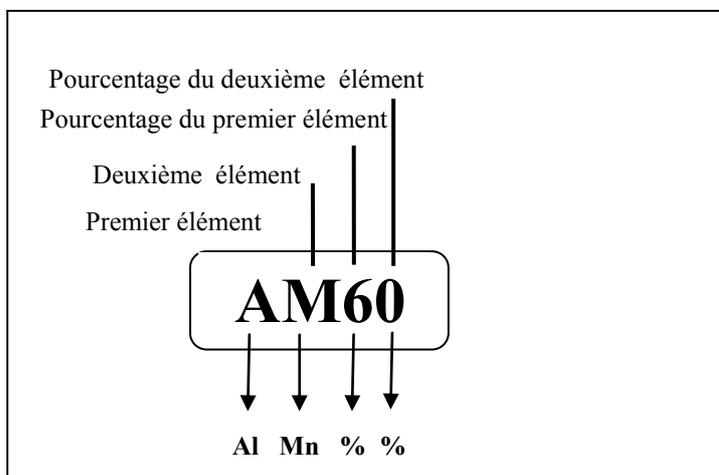
3. Les alliages β

Les alliages β ne possèdent que de la phase β à température ambiante et ils sont complètement stabilisés par la présence d'une quantité importante en éléments β -gènes. Ces alliages ont une bonne formabilité à froid et ont une bonne soudabilité.

Classification	ASTM	Material	Chemical composition (wt%)												
			N	C	H	Fe	O	Al	V	Sn	Mo	Cr	Zr	Pd	Ti
PURE TITANIUM	Grade 1	Ti-Grade 1	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.20	≤ 0.18	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
	Grade 2	Ti-Grade 2	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.30	≤ 0.25	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
	Grade 3	Ti-Grade 3	≤ 0.05	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.30	≤ 0.35	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
	Grade 4	Ti-Grade 4	≤ 0.05	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.50	≤ 0.40	-	-	-	-	-	-	-	Bal.
TITANIUM ANTI-CORROSION ALLOY	Grade 7	Ti-0.15Pd	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.30	≤ 0.25	-	-	-	-	-	-	0.12-0.25	Bal.
	Grade 11	Ti-0.15Pd	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.20	≤ 0.18	-	-	-	-	-	-	0.12-0.25	Bal.
TITANIUM α ALLOY	Grade 6	Ti-5Al-2.5Sn	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.50	≤ 0.20	4.00-6.00	-	2.00-3.00	-	-	-	-	Bal.
TITANIUM α - β ALLOY	Grade 9	Ti-3Al-2.5V	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.25	≤ 0.12	2.50-3.50	2.00-3.00	-	-	-	-	-	Bal.
	Grade 5	Ti-6Al-4V	≤ 0.05	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.40	≤ 0.20	5.50-6.75	3.50-4.50	-	-	-	-	-	Bal.
	Grade 23	Ti-6Al-4V ELI	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.0125	≤ 0.25	≤ 0.13	5.50-6.50	3.50-4.50	-	-	-	-	-	Bal.
TITANIUM β ALLOY	Grade 19	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.012	≤ 0.30	≤ 0.12	3.00-4.00	7.50-8.50	-	3.50-4.50	5.50-6.50	3.50-4.50	-	Bal.

Annexe 3 :

Alliages de magnésium: Désignation, propriétés et applications [22, 65]



Lettre	Élément
A	Aluminium
C	Cuivre
E	Métaux rares
H	Thorium
K	Zirconium
L	Lithium
M	Manganèse
Q	Argent
S	Silicium
Y	Yttrium
Z	Zinc

Description de l'alliage	Éléments d'addition	Propriétés et applications
AZ91	9.0 % Al, 0.7 % Zn, 0.2 % Mn	Bonne coulabilité et bonnes propriétés mécaniques à T < 423 K. Applications : pièces automobiles, d'ordinateur, de téléphones portables, articles de sports, boîtiers, outillages à main, les équipements ménagers...
AZ31	3.0 % Al, 1.0% Zn, 0.13 % Mn	Bon alliage d'extrusion, très faible densité. Applications : Matériau apprécié pour la conception de structures légères
AM60	6.0 % Al, 0.15 % Mn	Meilleure ténacité et ductilité que AZ91. Applications : Pièces automobiles, les ventilateurs, boîtiers...
AM50	5%, Al, 0.13% Mn	Bonne résistance, ductilité, absorption d'énergie et coulabilité. Applications : Pièces automobiles, les ventilateurs, boîtiers...
AM20	Mg-Al system	Haute ductilité, ténacité, faible aptitude au moulage sous pression. Applications : Pièces de sécurité automobile ou la ductilité la plus élevée possible est requise

Références

Références

- [1] N. Amanat, N. L. James, D. R. McKenzie, *Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices*, *Medical Engineering & Physics* **32**, 690-699, 2010.
<https://doi:10.1016/j.medengphy.2010.04.011>
- [2] M. Bouzekri, *Soudage MAG dans l'industrie automobile*, *Technique de l'Ingénieur*, Réf : BM7731 v1, 2015.
- [3] R. Deroche, *Soudage électrique des rails de chemins de fer*, *Technique de l'Ingénieur*, Réf : BM 7780, 2006.
- [4] X. Sun, E. Shehab, J. Mehnen, *Knowledge modeling for laser beam welding in the aircraft industry*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **66**, 763-774, 2013.
<https://doi:10.1007/s00170-012-4364-0>
- [5] J. P. Ferte, *Assemblage métallurgique dans la construction des turboréacteurs*, *Techniques de l'ingénieur*, Réf :BM7778, 2006.
- [6] R. Lévêque, J. Saleil, T. Cassagne, *Matériaux pour l'industrie pétrolière et gazière*, *Matériaux & Techniques* **101**, N06, 2013.
- [7] P. Paillard, *Procédés de soudage*, *Techniques de l'ingénieur*, Réf : BM7700, 2014.
- [8] A. Fysikopoulos, G. Pastras, J. Stavridis, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, *On the performance evaluation of remote laser welding process: an automotive case study*, 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems CIRP CMS 2015, *Procedia CIRP* **41**, 969-974, 2016.
<https://doi:10.1016/j.procir.2016.01.005>
- [9] J. M. Bergheau, *Modélisation numérique des procédés de soudage*, Technical report, *Techniques de l'Ingénieur*, Réf : BM7758, 2004.
- [10] www.ansys.com
- [11] www.flow3d.com
- [12] <https://www.sintef.no>
- [13] www.transvalor.com
- [14] V. Robin, É. Feulvarch, *Le logiciel SYSWELD®: application dans le cadre de projets de recherche*, 8^e Colloque national en calcul des structures, Giens, France, 2007.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01493130>
- [15] A.P. Mackwood, R. Crafer, *Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review*. *Opt. Laser Technol.* **37**, 99-115, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.02.07>
- [16] Josefine Svenungsson, Isabelle Choquet, Alexander F. H. Kaplan, *Laser welding process – a review of keyhole welding modeling*, *Physics Procedia* **78**, 182 –191, 2015.
- [17] K. Moussaoui, M. Mousseigne, J. Senatore, R. Chieragatti, F. Monies, *Influence of Milling on the Fatigue Lifetime of a Ti6Al4V Titanium Alloy*, *Int J Adv Manuf Technol* **67**, 1477-1489, 2013.
<https://doi:10.3390/met5031148>
- [18] L. Boccarusso, G. Arleo, A. Astarita, F. Bernardo, P. De Fazio, M. Durante, F. Memola C. Minutolo, R. Sepe, A. Squillace, *A new approach to study the influence of the weld bead morphology on the fatigue behaviour of Ti–6Al–4V laser beam-welded butt joints*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **88**, 75-88, 2017.
<https://doi:10.1007/s00170-016-8764-4>
- [19] A. Settefrati, *Étude expérimentale et modélisation par champ de phase de la formation de [alpha] dans les alliages de titane [bêta]-métastable*, Doctorat, Université de Lorraine, 2012.

- [20] E. Piyush, R. Raghu, M.S. Rakesh, S.G. Sriram, *Magnesium Alloy Casting Technology for Automotive Applications- A Review*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), **04** (10), 675-681, 2017.
- [21] I. Ostrovsky, Y. Henn, *Present state and future of magnesium application in aerospace industry*, International Conference “New Challenges In Aeronautics”, ASTEC’07, Moscow, August 19-22, 2007.
- [22] W. A. Monteiro, *The Influence of Alloy Element on Magnesium for Electronic Devices Applications – A Review*, Light Metal Alloys Applications, chapter 10, 2014.
<http://dx.doi.org/10.5772/58460>
- [23] M. Davis, P. Kapadia, J. Dowden, *Modeling the fluid flow in laser beam welding*, Supplement to the Welding Journal, 147-167, 1986.
http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1986_07_s167.pdf
- [24] K. Abderrazak, S. Bannour, H. Mhiri, G. Lepalec, M. Autric, *Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy*, Comput. Mater. Sci. **44**, 858-866, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.06.002>
- [25] S. Bannour, K. Abderrazak, H. Mhiri, G. Le Palec, *Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy*. Opt. Laser Technol. **44**, 2459-2468, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.034>
- [26] G. Tirand, C. Arvieu, E. Lacoste, J.M. Quenisset, *Control of aluminum laser welding conditions with the help of numerical modeling*, J. Mater. Process. Technol. **213**, 337-348, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.014>
- [27] R. Rai, J.W. Elmer, T.A. Palmer, T. DebRoy, *Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium*, J. Phys. D Appl. Phys. **40**, 5753-5766, 2007.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/037>
- [28] A. Belhadj, J. Bessrou, J.E. Masse, M. Bouhafs, L. Barrallier, *Finite element simulation of magnesium alloys laser beam welding*, J. Mater. Process. Technol. **210**, 1131-1137, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.023>
- [29] K. Abderrazak, W. Ben Salem, H. Mhiri, G. Lepalec, M. Autric, *Modelling of CO2 laser welding of magnesium alloys*, Opt. Laser Technol. **40**, 581-588, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.10.003>
- [30] A. Mathieu, A. Metais, I. Tomashchuk, *Mesure de température en surface d'un bain de soudage TIG*, Congrès SFT 2016, Toulouse, May 2016.
- [31] K. Weman, *Procédés de soudage*, Dunod, Paris, 2012.
- [32] N. Perry, *Étude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables*, Doctorat, Université de Nantes, 2000.
- [33] M. Courtois, M. Carin, Ph. Le Masson, S. Gaied, M. Balabane, *Modélisation thermo-hydraulique tridimensionnelle du soudage laser et validation expérimentale*, Matériaux & Techniques **102**, 404, 2014.
<https://doi:10.1051/mattech/2014033>
- [34] C. Ferdinand, *Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires*, Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [35] O. Desmaison, *Modélisation numérique d'un procédé de soudage hybride arc/laser en approche Level Set, Application au soudage multi-passes de tôles d'acier de forte épaisseur*, Doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 2013.
- [36] M. Hamide, *Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers*, Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

- [37] A. Traidia, *Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools*, Doctorat, École Polytechnique France, 2011.
- [38] X. Kong, O. Asserin, S. Gounand, P. Gilles, J. M. Bergheau, M. Medale, *3D finite element simulation of TIG weld pool*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **33**: 012025, 2012.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/33/1/012025>
- [39] G. A. Taylor, M. Hughes, N. Strusevich, K. Pericleous, *Finite volume methods applied to the computational modeling of welding phenomena*, Applied Mathematical Modelling, **26**, 309-320, 2002.
- [40] <https://www.comsol.com/>
- [41] C. Grignon, E. Petitpas, R. Perinet, J. Condoure, *Modélisation thermométallurgique appliquée au soudage laser des aciers*, Int. J. Therm. Sci. **40**, 669-680, 2001.
- [42] <https://www.sintef.no>
- [43] N. Venkatramani, *Industrial plasma torches and applications*, Current Science **83**(3), 2002.
- [44] E. Le Guen, *Étude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique*, Doctorat, Université De Bretagne-Sud, 2011.
- [45] W. M. Steen, *Laser Material Processing*, Springer-Verlag, London, 3rd edition, 2003.
- [46] J. Niu, W. Guo, M. Guo, S. Lu, *Plasma application in thermal processing of materials*, Vacuum **65**, 263–266, 2002.
- [47] <https://ceal-aluquebec.com/soudage-laser-aluminium/>
- [48] H. Ki, P.S. Mohanty, J. Mazumder, *Modeling of high density laser material interaction using fast level set method*, Journal of Physics D: Applied Physics **34**(3), 364-372, 2001.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/3/320>
- [49] L. Commin, *Assemblage des alliages de magnésium lamines à Chaud par soudage friction malaxage et soudage Laser - approche expérimentale vers une Compréhension des propriétés mécaniques*, Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2008.
- [50] A. Salminen, S. Baskutis, E. Petronis, *Influence of welding modes on weldability of structural steel lap joints in laser welding*, Journal of Laser Applications, **29**(2), 022419(1-7), 2017.
<https://doi.org/10.2351/1.4983245>
- [51] X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarigeon, W. Wallace, *A review of laser welding techniques for magnesium alloys*, Journal of Materials Processing Technology **171**, 188-204, 2006.
- [52] M. Boivineau, C. Cagran, D. Doytier, V. Eyraud, M. -H. Nadal, B. Wilthan, G. Poltlacher, *Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V (TA6V) Alloy*, International Journal of Thermophysics **27**(2), 507-529, 2006.
- [53] Y. Robert, *Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsif : caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécanique associées à ce procédé*, Doctorat, École des Mines de Paris, 2007.
- [54] C. Ferdinand, J. Alexis, T. Masri, J.-A. Petit, J.-C. Ganza, *Characterization of refractory titanium alloys welded by TIG and laser processes*, 11th World Conference on Titanium, Kyoto, Japan, 03-07 June 2007.
- [55] A.S.H. Kabir, X. Cao, J. Gholipour, P. Wanjara, J. Cuddy, A. Birur, M. Medraj, *Effect of postweld heat treatment on microstructure, hardness, and tensile properties of laser-welded Ti-6Al-4V*, Metall. Mater. Trans. A **43**, 4148-4171, 2012.
- [56] S.T. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, S.M. Manladan, *A review on laser beam welding of titanium alloys*. Int. J. Adv. Manuf. Technol **97**(1-4), 1071-1098, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2030-x>
- [57] Y. Combres, *Métallurgie et recyclage du titane et de ses alliages*, Techniques de l'ingénieur, Réf : M2355 v2, 2016.

- [58] X. Boidin, *Contribution à l'étude expérimentale et numérique à l'échelle de la microstructure de l'écaillage d'un alliage de titane*, Doctorat, Université Paul Verlaine de METZ, 2005.
- [59] M. Fischer, *Élaboration in situ d'alliages de titane et de structures architecturées par fabrication additive : application aux dispositifs médicaux implantables*, Doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [60] R. Wanhill, S. Barter, *Fatigue of Beta Processed and Beta Heattreated Titanium Alloys*, Springer, Dordrecht, 2011.
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-94-007-2524-9>
- [61] J. Yang, , S. Sun, , M. Brandt, W. Yan, *Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy*, J. Mater. Process. Technol. **210**, 2215-2222, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007>
- [62] K.C. Mills, *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2002.
- [63] L. Weiss, *Contribution au développement d'un procédé de découpe laser haute-énergie/jet d'eau haute-pressure couplés : Application à la découpe d'alliages métalliques*, Doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [64] F. Caiazzo, F. Curcio , G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Ottonelli, *Lap and butt joining by a CO2 laser of titanium alloys for civil and military high speed aircraft*, 10th World Conference on Titanium, Hamburg, IV, 2651-2658, 2003.
<https://www.researchgate.net/publication/236334788>
- [65] B. B. Buldum, A. Sik, I. Ozkul, *Investigation of magnesium alloys machinability*, International Journal of Electronics; Mechanical and Mechatronics Engineering, **2**(3), 261-268, 2012.
- [66] A. Belhadj, *Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : Application aux alliages de magnésium*, Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers et Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2009.
- [67] M. K. Kulekci, *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*, Int J Adv Manuf Technol **39**, 851-865, 2008.
<https://doi:10.1007/s00170-007-1279-2>
- [68] A. Wendt, K. Weiss, A. Ben-Dov, M. Bamberger, B. Bronfin, *Magnesium Castings in Aeronautics Applications—Special Requirements*, Magnesium Technology, TMS-2005 Conference (The Minerals, Metals & Materials Society), San Francisco, USA, 2005.
- [69] A. Tadamalle, Y.P. Reddy, E. Ramjee, V.K. Reddy, *Influence of welding speed on the melting efficiency of Nd:YAG laser welding*, Advances in Production Engineering & Management, **9**(3), 128-138, 2014.
<http://dx.doi.org/10.14743/apem2014.3.182>
- [70] A. H. Faraji, M. Goodarzi, S. H. Seyedein, G. Barbieri, C. Maletta, *Numerical modeling of heat transfer and fluid flow in hybrid laser–TIG welding of aluminum alloy AA6082*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **77**(9–12), 2067-2082, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6589-6>
- [71] M. Aissani, H. Maza, B. Belkessa, B. Maamache, *Contribution à la modélisation du soudage TIG des tôles minces d'acier austénitique 304L par un modèle source bielliptique avec confrontation expérimentale*, J. Phys. IV, **124** 213-220, 2005.
<https://doi:10.1051/jp4:2005124031>
- [72] L-E. Lindgren, L. Karlsson, *Deformations and stresses in welding of shell structures*, International Journal for Numerical Methods in Engineering **25**(2), 635-655, 1988.
- [73] K. Abderrazak, W. Kriaa, W. Ben Salem, H. Mhiri, G. Lepalec, M. Autric, *Numerical and experimental studies of molten pool formation during an interaction of a pulse laser (Nd:YAG) with a magnesium alloy*, Optics & Laser Technology **41**, 470-480, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.07.012>

- [74] Z. Gao, *Numerical modeling to understand liquation cracking propensity during laser and laser hybrid welding (I)*, Int J Adv Manuf Technol **63**, 291-303, 2012.
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-3907-8>
- [75] M. Akbari, S. Saedodin, T. Toghraie, R. Shoja-Razavi, F. Kowsari, *Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy*, Opt. Laser Technol. **59**, 52-59, 2014.
- [76] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, *A new finite element model for welding heat sources*, Metallurgical Transactions B **15**, 299-305, 1984.
- [77] J. Goldak, M. Bibby, J. Moore, R. House, B. Patel, *Computer modeling of heat flow in welds*, Metallurgical Transactions B **17**, 587-600, 1986.
- [78] S. Wu, H-Y. Zhao, Y. Wang, X-H. Zhang, *A new heat source model in numerical simulation of high energy beam welding*, Transactions of the China Welding Institution **25**(1), 91-94, 2004.
- [79] J. Ma, F. Kong, R. Kovacevic, *Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification*, Materials and Design **36**, 348-358, 2012.
- [80] M. Mostafa, *Etude du perçage et du soudage laser : dynamique du capillaire*, Doctorat, Université de Bourgogne, 2011.
- [81] N. Siva Shanmugam, G. Buvanashakaran, K. Sankaranarayananasamy, *Some Studies on Temperature Distribution Modeling of Laser Butt Welding of AISI 304 Stainless Steel Sheets*, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering **7**(7) 2013.
- [82] J. Ahn, L. Chen, C. M. Davies, J. P. Dear, *Parametric optimization and microstructural analysis on high power Yb-fibre laser welding of Ti-6Al-4V*, Opt. Laser Eng. **86**, 156-171, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.06.002>
- [83] W. K. C. Yung, B. Ralph, W.B. Lee, R. Fen, *An investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds*, Journal of Materials Processing technology **63**(1), 759-764, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02719-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02719-7)
- [84] N. Kherrouba, M. Bouabdallah, R. Badji, D. Carron, M. Amir, *Beta to alpha transformation kinetics and microstructure of Ti-6Al-4V alloy during continuous cooling*, Materials Chemistry and Physics **181**, 462-469, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.06.082>
- [85] K. Agrebi, A. Belhadj, M. Bouhafis, *Simulation numérique du comportement thermo-métallurgique couplé au cours du soudage TIG*, 3ème Séminaire des Nouvelles Technologies de Soudage SNTS'2017, Hammamet Tunisie, 17-19 Novembre 2017.
- [86] E. d. S. Magalhaes, A. L. F. de Lima e Silva, S. M. M. de Lima e Silva, *A GTA Welding Cooling Rate Analysis on Stainless Steel and Aluminum Using Inverse Problems*, Applied Sciences **7**(2), 122-137, 2017.
<https://doi.org/10.3390/app7020122>
- [87] H.G. Fan, H.L. Tsai, S.J. Na, *Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding*, Int. J. Heat Mass Transf. **44**, 417-428, 2001.
- [88] V. Negi, S. Chattopadhyaya, *Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process*, Advances in Materials Science and Engineering **2013**, 1-9, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/543594>
- [89] R. Daneshkhah, M. Najafi, H. Torabian, *Numerical simulation of weld pool shape during laser beam welding*, International Research Journal of Applied and Basic Sciences, **3** (8), 1624-1630, 2012.
- [90] E.H. Amara, *Humping Modelling in Deep Penetration Laser Welding*, Lasers in Eng. **5**, 299-308, 2010.
https://doi.org/10.1007/978-1-84996-432-6_62

- [91] O. Babahani, *Simulation numérique par la méthode de Monte Carlo de la déposition de couches minces par procédés CV*, Thèse de Doctorat, Université de Ouargla, 2013.
- [92] P. Kong, *Atmospheric-Pressure Plasma Process and Applications*, SOHN International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials: Principles, Technologies and Industrial Practice, United States of America, September 2006.
- [93] M. Bahrami, *Radiation Heat Transfer*, Chapter 12, E&CE 309, Spring, 2005.
- [94] G. Zhang, C. S. Wu, Z. Liu, *Experimental observation of both keyhole and its surrounding thermal field in plasma arc welding*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 439-448, mars 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.036>
- [95] Y. Rotrou, *Thermographie courtes longueurs d'onde avec des caméras silicium : contribution à la modélisation radiométrique*, Doctorat, Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse, 2006.
- [96] J. Taine, J. P. Petit, *Transferts thermiques*, éd. Dunod, Paris 1995.
- [97] M. Sassi, L. Pierre, J. Bdnard, C. Cahen, *Calcul et mesure de la température d'un plasma à l'aide des raies d'émission du cuivre*, J. Phys **4**, 123-141, 1994.
- [98] S. Palanco, M. Klassen, J. Skupin, K. Hansen, E. Schubert, G. Sepold, J.J. Laserna, *Spectroscopic diagnostics on CW-laser welding plasmas of aluminum alloys*, Spectrochimica Acta Part B **56**, 651-659, 2001.
- [99] J. Mirapeix, A. Cobo, D. A. González, J. M. López-Higuera, *Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis for arc-welding quality assurance*, Optics Express **15**(4), 1884-1897, 2007.
- [100] M.S. Węglowski, *Investigation on the arc light spectrum in GTA welding*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering **20**(1-2), 2007.
- [101] Z. Zhang, F. Zhang, *Spectral Analysis of Welding Plasma of Magnesium Alloy Using Flux Coated Wire*, Materials Transactions **50**(8), 1909-1914, 2009.
<https://doi:10.2320/matertrans.M2009023>
- [102] S. Lemkaddem, F. Khelfaoui, *Spectre de raies d'émission d'une torche à plasma en utilisant la technique de l'inversion d'Abel*, Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Ouargla, Algérie, **1**(3), 58-65, 2009.
- [103] Y. Bennana, *Etude spectroscopique des élargissements Doppler des plasmas lors de la soudure aux lasers*, Master académique, Université de Ouargla, 2015.
- [104] R. Bekhouche, *Elargissement électronique des raies spectrales lors de soudure aux lasers*, Master académique, Université de Ouargla, 2016.
- [105] S. Lemkaddem, F. Khelfaoui, *Modélisation du comportement thermique au cours du soudage des métaux par faisceau laser*, Rev. Sci. Fond. App. **4** (1), 80-86, 2012.
- [106] S. Guerrida, *Étude de la soudure au laser en industrie*, Master académique, Université de Ouargla, 2012.
- [107] S. Guerrida, S. Lemkaddem, K. Telib, F. Khelfaoui, *Calcul des distributions de températures à deux dimensions au niveau du bain de fusion lors des soudures aux lasers*, SIPP'2015, UKM Ouargla, 16 - 17 Février 2015.
- [108] K. Telib, *Étude de la soudure au laser aux limites des températures de fusion des métaux*, Master académique, Université de Ouargla, 2013.
- [109] K. Telib, S. Lemkaddem, F. Khelfaoui, *Calcul numérique des températures lors de soudage laser de l'alliage TA6V aux limites des températures de fusion*, SIPP'2015, UKM Ouargla, 16-17 Février 2015.
- [110] S. Khemgani, *Étude du rayonnement thermique lors de la soudure au Laser de plaques métalliques*, Master académique, Université de Ouargla, 2014.
- [111] S. Lemkaddem, S. Khemgani, F. Khelfaoui, *Radiation and convection losses during laser welding of TA6V titanium alloy*, The 3rd International Seminar on Plasma Physics, Ouargla, Algeria, 16 - 17 February 2015.
- [112] F. Hathat, *Étude des vitesses de gaz de protection dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques*, Master académique, Université de Ouargla, 2017.

- [113] N. Guessoum, F. Benatallah, *Échange de chaleur entre les gaz de protection et les pièces d'alliages métalliques*, Master académique, Université de Ouargla, 2018
- [114] S. Benchaa, *Répartition spatiale et temporelle d'énergie de sources lasers utilisées dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques*, Master académique, Université de Ouargla, 2017.
- [115] S. Lemkaddem, R. Bekhouche, Y. Bennana, F. Khelfaoui, *Spectroscopie d'émission des plasmas dans les procédés de soudage des métaux*, 3^{ème} Séminaire des Nouvelles Technologies de Soudage SNTS'2017, Hammamet Tunisie, 17-19 Novembre 2017.
- [116] I. Popa, *Modélisation numérique du transfert thermique - méthode des volumes finis*, Maison d'édition Universitaria, Craiova, 2002.
ISBN : 973-8043-111-1
- [117] J. Rońda, A. Siwek, *Modelling of laser welding process in the phase of keyhole formation*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, **2011**(3) 2011.
- [118] J. Bessrouf, M. Bouhaf, R. Khadrani, M. Jemmali, *Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source Laser mobile*, International Journal of Thermal Sciences **41**(11), 1055-1066, 2002.
[https://doi:10.1016/S1290-0729\(02\)01392-3](https://doi:10.1016/S1290-0729(02)01392-3)
- [119] W. Piekarska, M. Kubiak, *Theoretical investigations into heat transfer in laser-welded steel sheets*, Therm Anal Calorim **110**, 159-166, 2012.
<https://doi:10.1007/s10973-012-2486-0>
- [120] P. Coppa, A. Consorti, *Normal emissivity of sample surrounded by surfaces at diverse temperatures*, Measurement **38**, 124-131, 2005.
- [121] www.engineeringtoolbox.com
- [122] S. Lemkaddem, F. Khelfaoui, O. Babahani, *Calculation of energy lost by radiation and convection during laser welding of TA6V titanium alloy*, Journal of Theoretical and Applied Physics, **12**(2), 113-120, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s40094-018-0288-x>
- [123] J.-P. Ciarlet, *Analyse Numérique et équations différentielles*, Collection Grenoble Sciences, ed. EDP Sciences, 2006..
- [124] M. Tahar Abbes, *Méthodes Numérique Tome 1*, Office des publications universitaire Edition 2.05.4775, Algérie, 2007.
- [125] J.-P. Demailly, *Analyse numérique et équations différentielles*, EDP Sciences Collection: Grenoble Sciences 4th edition, 2016.
- [126] G. H. Golub, C. Van Loan, *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press, Third edition, 1996.
- [127] L. Weiner, P. Chiotti, H. A. Wilhelm, *Temperature dependence of electrical resistivity of metals*, Ames Laboratory ISC Technical Reports. 58, 1952.
http://lib.dr.iastate.edu/ameslab_iscreports/58
- [128] H. Hucek, m. Wahll, *Handbook of international alloy compositions and designations*, volume I Titanium, MCIC Report, 1976.
- [129] <http://www.fengyi-ti.com>

حساب الطاقة الضائعة أثناء التلحيم بالليزر لصفائح معدنية تتكون أساسا من Mg و Ti

الملخص:

للتلحيم دور مهم في كثير من مجالات الصناعة. الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الحراري والإشعاع المنبعث خلال تلحيم الصفائح المعدنية (سبائك التيتانيوم و المغنيزيوم). لقد استخدمنا معادلة الحرارة لوصف توزيع الطاقة في الحالات الصلبة والسائلة و أخذنا في الاعتبار تغير الطور من الصلب إلى السائل. تم استخدام نموذج عددي لوصف وحساب السلوك الحراري والطاقة الضائعة بسبب الحمل الحراري والإشعاع. لحل معادلة الحرارة استعملنا طريقة الفروق المنتهية باستخدام برنامج كمبيوتر بلغة الفورتران. تشير النتائج العددية إلى أن سرعة التلحيم و استطاعة الليزر المناسبة للتلحيم هي في اتفاق جيد مع البيانات التجريبية المنشورة سابقا. أظهرت النتائج المتحصلة عليها أهمية الطاقة الضائعة بسبب الإشعاع والحمل الحراري في منطقة التلحيم. لقد تم أيضا تحديد و دراسة الإشعاع الحراري المنبعث أثناء تلحيم الصفائح المعدنية. إن تلحيم ألواح من سبائك التيتانيوم TA6V بواسطة ليزر CO₂ باستطاعة 2500 W و سرعة 0.060 m/s أعطت ضياعا في الطاقة بنسبة 7-12%.

الكلمات الدالة:

التلحيم بالليزر، معادلة الحرارة، النمذجة العددية، السلوك الحراري، الحمل الحراري، الإشعاع الحراري، سبيكة التيتانيوم، سبيكة المغنيزيوم.

Calcul des pertes d'énergie lors de soudure aux lasers des plaques métalliques à base de Mg et Ti

Résumé:

Le soudage occupe une place importante dans plusieurs domaines d'industrie. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique et le rayonnement émis lors du soudage des plaques métalliques (alliages de titane et de magnésium) par Laser. Nous avons utilisé l'équation de la chaleur pour décrire la distribution de l'énergie des phases solide et liquide. Le changement de phase solide-liquide a été pris en considération. Pour résoudre l'équation de la chaleur, la méthode des différences finies a été utilisée à l'aide d'un programme numérique basé sur le langage FORTRAN. Les résultats numériques montrent que les vitesses et les puissances de soudage au laser appropriées sont en bon accord avec les données expérimentales publiées dans la littérature. Les résultats obtenus ont montré l'importance de l'énergie perdue par rayonnement et par convection dans la zone de soudage. Le rayonnement thermique émis a été déterminé et étudié lors du soudage de plaques métalliques. La soudure des plaques en alliage de titane TA6V par laser CO₂, de puissance 2500 W et une vitesse 0.060 m/s, donne une perte de 7-12 %.

Mots clefs :

Soudage laser, Équation de chaleur, Modélisation numérique, Comportement thermique, Convection, Rayonnement thermique, Alliage de titane, Alliage de Magnésium.

Calculation of energy losses during laser welding of metal plates based on Mg and Ti

Abstract:

Welding has an important role in several areas of industry. This work aims to study the thermal behavior and quantify the amount of energy lost by convection and by radiation during the CO₂ laser welding of metal plates (titanium and magnesium alloys). We used the heat equation to describe the energy distribution of solid and liquid states. The solid-to-liquid phase change was taken into account. A numerical model was used to describe and calculate the thermal behavior and the energy lost by convection and radiation. Finite difference calculations were performed using a FORTRAN-based computer program to solve the heat equation. The numerical results suggested that the appropriate laser welding velocity and power were in good agreement with the experimental data published elsewhere in the literature. The results showed the importance of the energy lost by radiation and convection in the welding area on welding energies and temperatures. The thermal emission was determined and studying during welding of metal plates. Laser welding of TA6V titanium alloy with a power of 2500 W and a speed of 0.060 m/s gives a loss of 7-12 %.

Keywords:

Laser welding, Heat equation, Numerical modeling, Thermal behavior, Convection, Thermal radiation, Titanium alloy, Magnesium alloy.