

N° d'ordre :
N° de série :

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES MATHÉMATIQUES
ET DES SCIENCES DE LA MATIÈRE
Département de physique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Rayonnement et Spectroscopie et Optoélectronique

Présenté par : **KHEMGANI Sabrina**

Thème :

**Etude du rayonnement thermique lors de la
soudure au Laser de plaques métalliques**

Soutenu publiquement

Le : 12/06/2014

Devant le jury composé de :

Pr BOUKRAA Aomar	Prof.	Président	UKM OUARGLA
Dr BABA HANI Oumelkheir	MCB	Examineur	UKM OUARGLA
Pr KHELFAOUI Fethi	Prof.	Rapporteur	UKM OUARGLA
Mme LEMKEDDEM Soumaya	MAA	Co-encadreur	UKM OUARGLA

Année Universitaire : 2013/2014

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qui m'ont donné le song de mon parcours, et je leur souhaite bonne santé et longue vie.

À tous les membres de la famille KHEMANG.

À tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, avons toute chose, je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donnée la force et la patience.

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Pr Fethi KHELFAOUI pour m'avoir constamment guidé tout long de ce projet et pour ses conseils précieux.

Je remercie mon Co-encadreur Mme Soumaya LEMKEDDEM pour son aide et son encouragement.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Président de jury Pr Aomar BOUKRAA et l'examineur Dr Oumelkheir BABAHANI d'avoir accepté de faire partie du jury afin de juger ce travail.

Je remercie également tout les membres du laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), où j'ai accompli ce travail, pour leurs aides et leurs conseils.

J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour leurs aides, soutiens et leurs conseils, sans oublier tout le staff administratif du département et surtout le Chef de Département de physique.

Merci à tous les collègues pour leur encouragement : Nour, Khadija, Wafa, Khemgani Abd Med Elmalek.

Enfin, grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribués de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

SOMMAIRE

Dédicace	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Tableau des constantes et des variables utilisées	ix

Introduction générale

Introduction générale	2
-----------------------	---

Chapitre I : Soudage au laser transfert de chaleur

I-1 le soudage par faisceau laser	3
I-1-1 - Principe du soudage au laser	3
I-1-2 - Paramètres du soudage laser	4
I-2 - Modes de transmission de la chaleur	4
I-2-1 -Transfert de chaleur par conduction	5
I-2-2 -Transfert de chaleur par convection	5
I-2-3 -Transfert de chaleur par rayonnement	5
I-3 - Emission de rayonnement thermique	6
I-4 - Des études antérieures sur le rayonnement thermique	6
I-5 - Différentes lois du rayonnement thermique	7
I-5-1 - Loi de Planck - Luminance spectrale du corps noir :	7
I-5-2 - Formule de Wien	8
I-5-3 - Loi de Stefan - Emission totale du corps noir	8
I-6 - Equation de conservation de l'énergie	8

Chapitre II : Modélisation numérique du transfert de l'énergie

II-1 - Définition du Phénomène Physique	9
II-2 - Modèle Mathématique	10
II-3 - Modélisation numérique	10
II-3-1 - Méthode des différences finies	10
II-3-2 - Application de la Méthode des Différences Finies aux points du maillage	12
II-3-3 -Conditions initiales et conditions aux limites	13
II-4 - Organigramme de calcul de température	15

Chapitre III : Résultats et discussion

III-1- Données physiques et numériques de l'opération de soudage	18
III-1-1- L'alliage de titane Ti-6Al-4V :	18
III-2- Vérification des équations et du programme	19
III-3- Distributions des températures	20
III-3-1- Variations des températures en fonction du temps	20
III-3-2- Températures à la surface pour différents instants	24
a) Variation de la température lors du soudage	24
b) Variation de la température lors du refroidissement	25
III-4- Calcul des pertes par rayonnement thermique	26
III-5- Calcul des pertes par convection	29
III-6- Comparaison entre les pertes par rayonnement et par convection	32
III-7- Rayonnement thermique en fonction de longueur d'onde	33
III-8- Calcul du bilan énergétique	35
III-9- Étude de la variation de la température et le rayonnement thermique lors du soudage du magnésium.	35
III-9-1- L'alliage de Magnésium Mg	35
III-9-2- Les conditions de soudure	36
III-9-3- Les températures des plaques et l'énergie perdue par convection et par rayonnement	36

Conclusions générales et perspectives

Conclusion générale et perspectives	37
Références bibliographiques	38
Résumé	

Liste des figures

Figure I. 1	Soudage en mode “capillaire”	3
Figure I.2	Paramètres du soudage par faisceau laser	4
figure I.3	Transfert d'énergie par rayonnement et par convection	5
Figure I. 4	Spectre électromagnétique	6
Figure II 1	Quelques phénomènes physiques au cours du soudage laser	9
Figure II 2	Schéma des noeuds de maillage	11
Figure II 3	Organigramme de calcul de température	17
Figure III 1	Variation de la température en fonction du temps en présence de la perte de chaleur par rayonnement et par convection	19
Figure III 2	Variation de la température en fonction du temps en l'absence de rayonnement thermique et la convection	19
Figure III 3	Comparaison entre les deux premières courbes sans perte de chaleur par rayonnement et par convection	20
Figure III 4	Variation de la température en fonction du temps à P=2900W	21
Figure III 5	Variation de la température en fonction du temps à P=3300W	21
Figure III 6	Variation de la température fonction le temps à P=4200W	22
Figure III 7	Variation de la température en fonction du temps pour V=0.04m/s	22
Figure III 8	Variation de la température en fonction du temps pour V=0.01m/s	23
Figure III 9	Variation de la température en fonction du temps pour V=0.009m/s	23
Figure III 10	Variation de la température en fonction de la position X durant la période de soudage	24
Figure III 11	Variation de la température en fonction de la position Y durant la période de soudage	24
Figure III 12	Variation de la température en fonction de la position X à la fin de la soudure	25
Figure III 13	Variation de la température en fonction de position Y à la fin de la soudure	25
Figure III 14	Variation de la température en fonction de la position X pendant le refroidissement	26

Figure III 15	Variation de la température en fonction de la position Y pendant le refroidissement	26
Figure III 16	La quantité d'énergie perdue par rayonnement thermique en fonction du temps	27
Figure III 17	La quantité d'énergie de rayonnement thermique perdue par la position X pendant le soudage	27
Figure III 18	La quantité d'énergie de rayonnement thermique perdue par la position Y pendant le soudage	28
Figure III 19	La quantité d'énergie du rayonnement thermique perdue en fonction de la position X pendant le refroidissement	28
Figure III 20	La quantité d'énergie perdue par rayonnement pour les positions Y pendant le refroidissement	29
Figure III 21	La quantité d'énergie perdu par convection en fonction de temps	29
Figure III 22	La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position X pendant le soudage	30
Figure III 23	La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position Y pendant le soudage	30
Figure III 24	La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position X durant le refroidissement	31
Figure III 25	La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position Y durant le refroidissement	31
Figure III 26	Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction du temps	32
Figure III 27	Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction du temps	32
Figure III 28	Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction des positions X	33
Figure III 29	Variation du rapport des énergies perdues en fonction du temps	33
Figure III 30	Variation la longueur d'onde maximale en fonction du temps	34
Figure III 31	Variation de la densité d'énergie en fonction de la longueur d'onde	34

Liste des figures

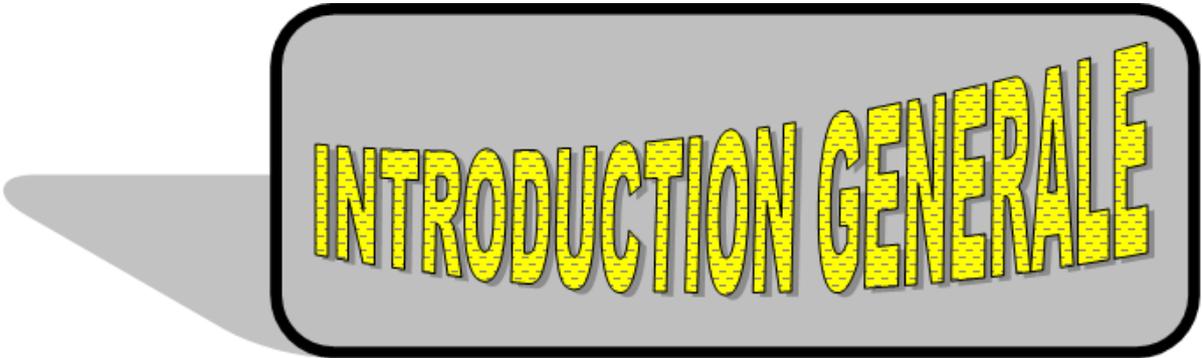
Figure III 32	Variation de la température en fonction du temps en présence de la perte de chaleur par rayonnement et convection	36
Figure III 33	Variation de la quantité d'énergie perdue en fonction temps	37
Figure III 34	Densité d'énergie spectrale à l'instant $t=4s$	37

Liste des tableaux

Tableau III.1	Les propriétés physiques[1] de TA6V utilisées dans les calculs .	18
Tableau III.2	Variation de la température avec perte par rayonnement et sans perte rayonnement	20
Tableau III.3	le pourcentage de variation de la température en fonction de puissances	22
Tableau III.4	Pourcentage du rayonnement thermique perdu par rapport à la convection	33
Tableau III.5	Les propriétés physiques [1] de Mg utilisées dans les calculs	35

Tableau indique les Constantes et variables utilisées

Elément	unité
h : coefficient de convection	w/m ² k
T : température	k
Temp : température imposée	k
T0 : température initiale	k
Q : source de chaleur volumique	w/m ³
S : surface	m ²
V : vitesse du spot laser	m/min
ρ : masse volumique	kg/m ³
Q : flux température	w
σ : constantino de stefan Boltzmann	w/m ² .k ⁴
λ : conductivité température	w/m.k
λ : longueur d'onde	μ m
t : temps	s
Cp : chaleur massique	j /kg. k
n : normale à la surface	sans
dimension	
x, y, z : coordonnée cartésiennes	mm



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le procédé soudage par laser chauffe localement le substrat et donne des soudures locales de très bonne qualité. Beaucoup de phénomènes et de mécanismes peuvent interférer. Les chercheurs s'intéressent à plusieurs aspects : l'aspect fluide du gaz, l'aspect réactions chimiques au niveau du gaz ou à la surface, l'aspect structure du joint de soudure, l'aspect thermique et l'aspect spectroscopie.

Le but de notre travail est l'étude et la modélisation du rayonnement thermique au niveau de la surface lors de la soudure au laser de deux plaques métalliques identiques. Nous avons essayé de réaliser les objectifs suivants :

1. Etude bibliographique sur les lasers et les procédés de soudure aux lasers.
2. Etude des propriétés du rayonnement thermique.
3. Choix d'un laser et d'un procédé de soudure et modélisation numérique du rayonnement thermique.
4. Etude de la dépendance du rayonnement thermique avec la température.

Le premier chapitre est une présentation des notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage par laser. Nous présentons les différents modes de transferts de chaleur, les lois du rayonnement thermique et l'équation de conservation de l'énergie.

Le deuxième chapitre est une présentation de la modélisation numérique pour le calcul de la température au niveau de la surface des matériaux à souder et le calcul du rayonnement thermique. Nous avons choisi la méthode des différences finies et la méthode itérative de Gauss-Seidel pour la résolution numérique des équations différentielles. L'organigramme des calculs du programme numérique élaboré est présenté.

Le troisième chapitre est destiné à l'analyse des résultats de la modélisation. Les résultats obtenus sont relatifs à l'alliage de titane TA6VL et une extension des calculs au métal de magnésium Mg.

Le mémoire se termine par une conclusion générale exposant les principaux résultats et les perspectives futures.



CHAPITRE

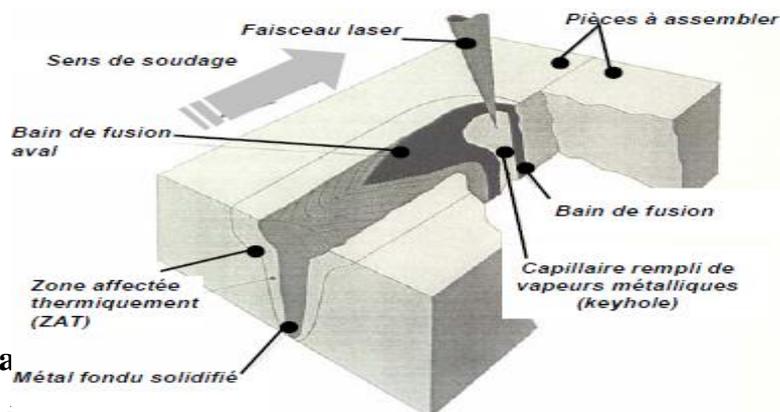
Chapitre I : Soudage au laser et transfert de chaleur

I-1- Le soudage par faisceau laser

Le soudage laser est réalisé à l'aide d'une source laser émettant dans l'infrarouge. Le faisceau représente un réel danger pour la sécurité des travailleurs. En conséquence, le soudage est effectué par un robot (ou tout autre manipulateur) dans une enceinte fermée, étanche à la lumière. Il est possible de souder au laser selon deux modes : en conduction ou en trou de serrure (keyhole). Le soudage par conduction s'effectue à l'état liquide et requiert une densité d'énergie d'environ 10^5 W/cm^2 . Le soudage en trou de serrure, quand à lui, implique la vaporisation du métal sous l'action d'une énergie d'au moins 10^6 W/cm^2 . Le capillaire, petit « tube » de vapeur métallique se formant dans la pièce, permet l'obtention d'un joint présentant le profil étroit et profond typique au soudage laser, alors que le soudage par conduction produit des joints plus larges que profonds. Sachant que le diamètre du faisceau laser frappant le matériel est de l'ordre du demi-millimètre, une source laser de plus de 1 kW est le plus souvent requise pour souder en trou de serrure.

I-1-1- Principe du soudage au laser

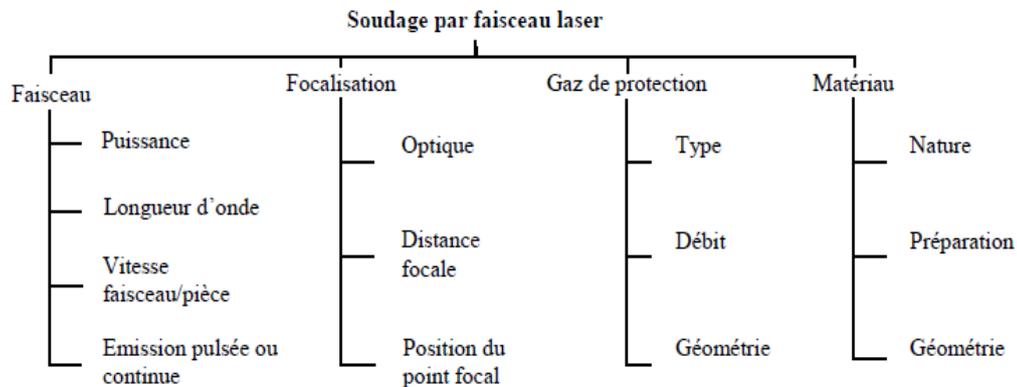
Le faisceau laser est orienté par un jeu de miroirs ou par fibre optique de la source vers une tête de soudage où il passe par un système de focalisation permettant de réduire son diamètre. Après focalisation, le faisceau est envoyé directement sur la surface des pièces à souder. L'effet du rayon laser sur la matière est dû à son absorption en surface où il se transforme en chaleur. Cette énergie peut être concentrée par focalisation sur une surface extrêmement réduite (figure I.1), produisant de fortes densités de puissances de l'ordre de 10^5 W/cm^2 à 10^7 W/cm^2 [1]



I-1-2- Pa

Le soudage par faisceau laser dépend de plusieurs paramètres qui sont liés au faisceau laser, au système de focalisation, au matériau et au gaz de protection. L'organigramme de la figure I. 2 récapitule les différents paramètres mis en jeu dans un procédé d'assemblage par

faisceau laser. Dans ce qui suit nous allons illustrer l'influence des paramètres technologiques du procédé, puissance, vitesse de soudage, position du point focal et le gaz de protection, sur la qualité du cordon de soudure obtenue.



I-2- Modes de transmission de la chaleur

La diversité des opérations thermiques industrielles est considérable : traitement thermique, cuisson, séchage... Ces opérations thermiques nécessitent une source de production de chaleur puis le transfert de cette chaleur vers l'objet à traiter. La transmission de la chaleur peut s'effectuer :

- * par conduction,
- * par convection,
- * par rayonnement.

Dans le domaine des basses températures, la convection et la conduction jouent un rôle important. Le flux transmis par rayonnement devient dominant aux températures supérieures à 400°C. La figure ci-dessous montre la part relative du transfert de chaleur par rayonnement et par convection naturelle en fonction de la température.

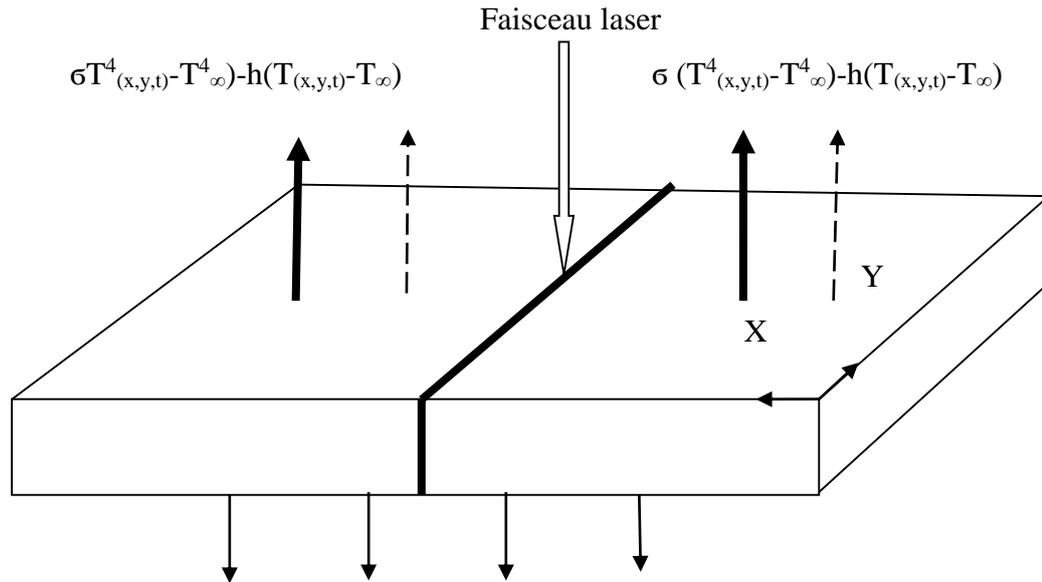


Figure I.3 : Transfert d'énergie par rayonnement et par convection

I-2-4-Transfert de chaleur par conduction

Ce mode de transfert réside dans la propagation de la chaleur de molécule à molécule dans un ou plusieurs corps contigus, opaques et solides.

I-2-5- Transfert de chaleur par convection

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide gazeux ou liquide en mouvement. L'étude de la convection (naturelle ou forcée) est liée à l'écoulement des fluides [2].

I-2-6- Transfert de chaleur par rayonnement

La conduction et la convection supposent la présence de matière. Le rayonnement permet un transfert d'énergie qui peut s'effectuer à travers le vide: c'est par rayonnement que nous arrive l'énergie solaire. Il s'agit ici de rayonnement électromagnétique. Soulignons que le rayonnement n'est pas un mode de transfert de chaleur mais d'énergie, celle-ci pouvant se transformer en chaleur au contact d'un corps (par exemple lorsque l'on s'expose au soleil à la plage; nous reviendrons sur cette transformation un peu plus loin). Ainsi, une partie de l'énergie solaire sert à l'assimilation chlorophyllienne des végétaux et ne transforme donc pas en chaleur.

Lorsqu'un corps rayonne, cette émission peut provenir de différentes sources d'énergies (décharge électrique dans un gaz raréfié, émission photochimique, etc.). On s'intéresse ici au rayonnement (purement) thermique (ou par incandescence): il ne dépend que de la température de la source.

I-3- Emission de rayonnement thermique

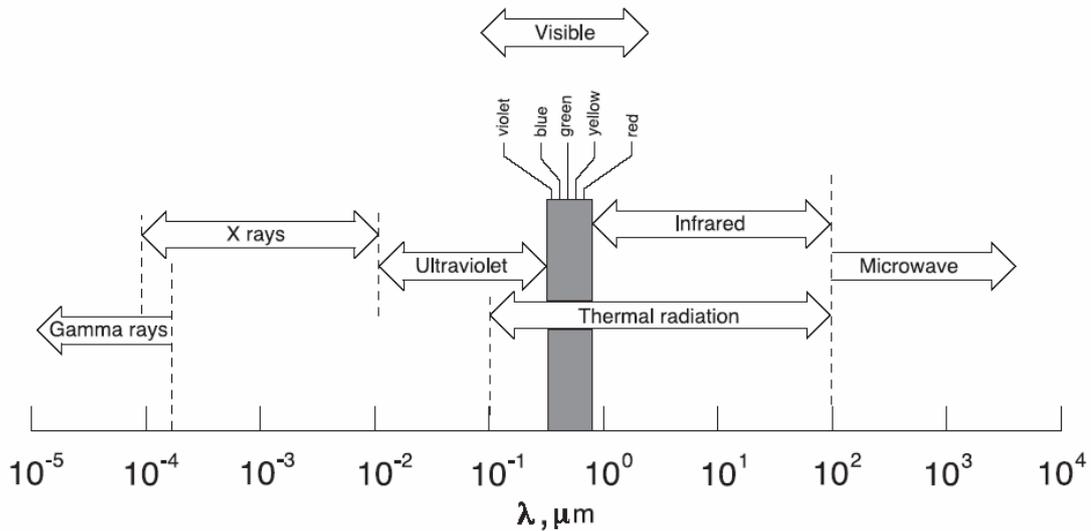


Figure I.4: Spectre électromagnétique [3]

Le rayonnement électromagnétique couvre une large gamme de longueur d'onde. Comme le montre la figure I.4 la vague de rayonnement thermique est une étroite bande sur le spectre d'ondes électromagnétiques. L'émission de rayonnement thermique est un résultat direct de mouvements vibratoires et de rotation des molécules, des atomes et des électrons d'une substance. La température est une mesure de ces activités. Ainsi, le taux des émissions thermiques de rayonnement augment lorsque la température augmente. Ce que nous appelons la lumière est la partie visible du spectre électromagnétique qui se trouve à l'intérieur de la bande de rayonnement thermique. Le rayonnement thermique est un phénomène volumétrique. Cependant, pour des matières solides opaques tels que les métaux, le rayonnement est considéré comme étant un phénomène de surface, étant donné que le rayonnement émis par la zone intérieure n'atteint jamais la surface. On notera que les caractéristiques de rayonnement de surfaces peuvent être modifiées complètement en appliquant des couches minces de revêtements sur elles. [3]

I-4- Des études antérieures sur le rayonnement thermique

La perte de chaleur par rayonnement et la charge thermique ont été calculées par l'équation de la propagation de température [4]. Tous les transferts de chaleur de la charge, le rayonnement et la conductance ont été mesurés, mais la concentration est sur le Keyhole [5]. F. Doumenc, dans son étude du transfert de chaleur, la perte par rayonnement a été négligée [6]. G. Emilie s'est intéressé à la conductance et il n'a pas mentionné le rayonnement et la charge thermique [7].

Dans la référence [2] sont exprimées des méthodes détaillées de calcul du transfert de chaleur [2, 8, 9]. M. Akbari et al. (2014) [10] et R. Rai et al. (2007) [11] traitaient le calcul de l'alliage de titane Ti6Al4V. M. Bahrami, en 2005, traitait la convection et la conductivité

thermique [3]. Dans les travaux de C. Nicodeau en 2005 [12], il y avait une étude détaillée de la chaleur perdue par rayonnement. G. Tirand, dans ses travaux de doctorat (2012) [13], traitait le transfert de chaleur par conduction et mentionnait la façon d'aborder la convection et le rayonnement. D'autres travaux de doctorat négligeaient la perte de chaleur par rayonnement (exemple : [14]).

Une autre étude considérait que la perte par rayonnement et par convection est négligeable par rapport à l'énergie du laser (J. Zhou, et al. 2006) [15].

Une autre étude de recherche, faite par A. Belhadj. en 2009 [1], considérait tous les modes de transmission de la chaleur à une dimension [1]. Cette thèse qui traitait le transfert de chaleur par conduction thermique, négligeait les radiations et la convection [16].

I-5- Différentes lois du rayonnement thermique

I-5-1- Loi de Planck - Luminance spectrale du corps noir :

Soit un corps noir à la température T . On peut calculer la densité d'énergie du rayonnement (dit rayonnement noir) de ce corps. Le calcul fait appel à la mécanique quantique, le champ électromagnétique dans la cavité limitée du corps noir étant équivalent à un ensemble d'oscillateurs harmoniques indépendants en équilibre thermodynamique à la température T et obéissant à la statistique de Boltzmann. On montre que la luminance $L_{\lambda}^0(T)$ du corps noir est égale à la densité d'énergie du rayonnement multipliée par $\frac{4\pi}{c}$. (L'exposant 0 de L signifie corps noir). On en déduit la luminance spectrale du corps noir.

$$L_{\lambda}^0(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{(-1) + \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} \quad (\text{I.1})$$

Avec $C_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$ et

$C_2 = hc / k_B = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$

h_P : constante de Planck $h_P = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

k_B : constante de Boltzmann $k_B = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

I-5-2- Formule de Wien :

L'émittance spectrale présente un maximum pour une valeur λ_m qui obéit simplement à la loi de Wien :

$$\lambda_m = \text{constante} = 2898 \mu\text{m K} \quad (\text{I.2})$$

Cette loi est fondamentale pour comprendre un certain nombre de phénomènes faisant appel au rayonnement comme, par exemple, l'effet de serre.

I-5-3- Loi de Stefan - Emittance totale du corps noir :

Le calcul donne, après intégration sur λ , l'émittance totale, c'est-à-dire la puissance totale rayonnée dans le demi-espace supérieur par unité de surface du corps noir.

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (\text{I.3})$$

C'est la loi de Stefan où σ est la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Par exemple, le soleil peut être assimilé à un corps noir de température 5800K avec une émittance de $6 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}$ [17].

I-6- Equation de conservation de l'énergie:

L'équation de conservation de l'énergie peut être écrite sous la forme suivante en coordonnées cartésiennes :

Pour la phase solide :

$$\rho_s C p_s \left(\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \right) = (\lambda \bar{\nabla}^2 T_{(x,y,t)}) + Q_{(x,y,t)} - \sigma(T_{(x,y,t)}^4 - T_\infty^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_\infty) \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Avec: } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (z = 0)$$

Cp = Chaleur spécifique moyenne (J/Kg K); ρ = Densité volumique moyenne (kg/m³);
 λ = Conductivité thermique moyenne (W /m K).

Pour la phase liquide :

$$\rho_l C p_l \left(\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \right) = (\lambda \bar{\nabla}^2 T_{(x,y,t)}) + Q_{(x,y,t)} - \sigma(T_{(x,y,t)}^4 - T_\infty^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_\infty) \quad (\text{I.5})$$

$Q(x, y, t)$ = terme source ou apport d'énergie du laser (W/m³).

Où ρ est la masse volumique, Cp la capacité thermique massique, T la température.

Pour le changement de phase solide - liquide :

Soit φ la densité de flux de chaleur par diffusion à température constante. Il s'exprime d'après la loi de Fourier [18]:

$$\varphi = grad(T) - \sigma(T_{(x,y,t)}^4 - T_\infty^4) - h(T_{(x,y,t)} - T_\infty) \quad (\text{I.6})$$

Ce flux doit être égal à l'enthalpie de fusion pour le volume considéré.



CHAPITRE II

Chapitre II : Modélisation numérique du transfert de l'énergie

II-1- Définition du Phénomène Physique

Nous allons étudier la variation de la température (chauffage et refroidissement) dans un procédé de soudage au laser. Nous nous intéressons en particulier à la perte d'énergie par rayonnement et par convection. Il s'agit de la soudure de deux plaques métalliques rectangulaires identiques.

Ce travail est une extension de travaux réalisés dans le laboratoire LRPPS. Une première étude [19, 20] est réalisée sur la distribution de la température à la surface en fonction du temps dans les plaques de soudage avec un laser immobile. Tandis que une seconde étude considère le laser mobile avec le traitement de changement phase [21].

La figure suivante présente les différents phénomènes intervenant lors de la soudure au laser :

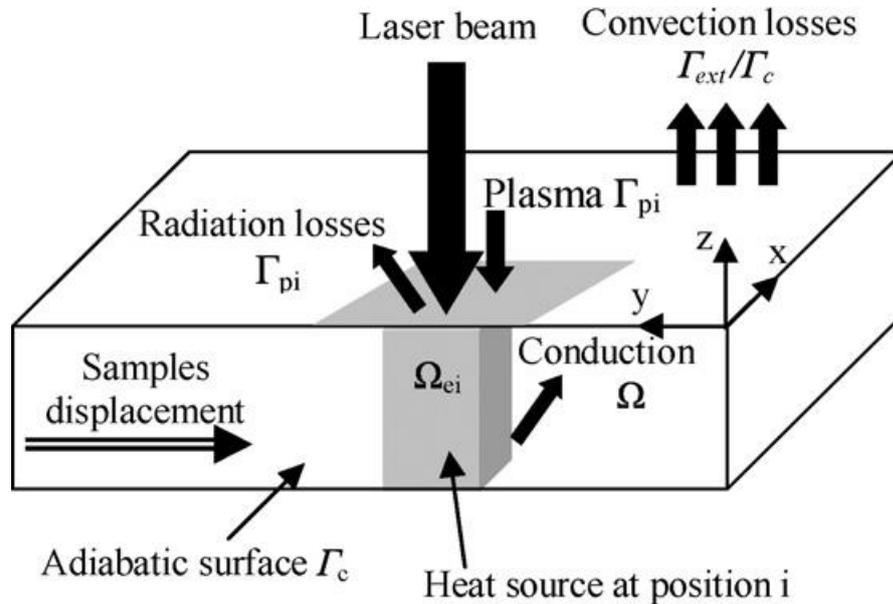


Figure II 1 : Quelques phénomènes physiques au cours du soudage laser [1]

II-2- Modèle Mathématique

Distribution de la chaleur dans la phase solide obéit à l'équation ci-dessous

$$\rho_s c p_s \left(\frac{\partial T_{(x,y,n)}}{\partial t} \right) = \lambda_s \nabla^2 T_{(x,y,n)} + Q_{(x,y,n)} - \sigma (T_{(x,y,n)}^4 - T_\infty^4) - h (T_{(x,y,n)} - T_\infty) \quad (\text{II.7})$$

C_{pS} : Chaleur spécifique (20°C).

ρ_s : Densité (kg/m³) (20°C).

λ_s : Conductivité thermique (W /m/K) (20°C).

Distribution de la chaleur entre la phase solide et le liquide vérifie l'équation ci-après :

$$d\varphi = \overline{g} \overline{d}T \cdot \overline{n} \cdot \overline{d}s - \sigma \cdot \overline{d}s (T_{(x,y,n)}^4 - T_\infty^4) - h \cdot \overline{d}s (T_{(x,y,n)} - T_\infty) \quad (\text{II.8})$$

$d\varphi$: Flux de chaleur

λ : Conductivité thermique

Distribution de la chaleur dans la phase liquide obéit à l'équation ci-dessous :

$$\rho_L c_{pL} \left(\frac{\partial T_{(x,y,n)}}{\partial t} \right) = \lambda_L \nabla^2 T_{(x,y,n)} + Q_{(x,y,n)} - \sigma (T_{(x,y,n)}^4 - T_\infty^4) - h (T_{(x,y,n)} - T_\infty) \quad (\text{II.9})$$

C_{pL} : Chaleur spécifique (T=Tf).

ρ_L : Densité (kg/m³) (T=Tf).

λ_L : Conductivité thermique (W /m/K) (T=Tf).

Q : Terme source (W/m³).

II-3-1- Modélisation numérique

II-3-1- Méthode des différences finies

La méthode des différences finies consiste à approximer les dérivées partielles d'une équation différentielle au moyen des développements de Taylor. Ceci se déduit directement de la définition de la dérivée. Par l'utilisation de développement Taylor et au schéma des différences finies [22] :

$$f(x \pm hx, y) = f(x, y) \pm hxf'(x, y) + \frac{hx^2}{2!} f''(x, y) \quad (\text{II.10})$$

$$f(x, y \pm hy) = f(x, y) \pm hyf'(x, y) + \frac{hy^2}{2!} f''(x, y) \quad (\text{II.11})$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^{n+1} = \frac{T_{(i,j)}^{n+1} - T_{(i-1,j)}^{n+1}}{hx} \quad (\text{II.12})$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^{n+1} = \frac{T_{(i,j)}^{n+1} - T_{(i,j-1)}^{n+1}}{hy} \quad (\text{II.13})$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)^{n+1} = \frac{T_{(i-1,j)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}}{(hx)^2} \quad (\text{II.14})$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)^{n+1} = \frac{T_{(i,j-1)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}}{(hy)^2} \quad (\text{II.15})$$

-Pour une position (i j)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j} = \frac{T_{(i,j)}^{n+1} - T_{(i,j)}^n}{ht} \quad (II.16)$$

- L'étude prendra les divisions sur les axes comme suit :
Faisceau laser •

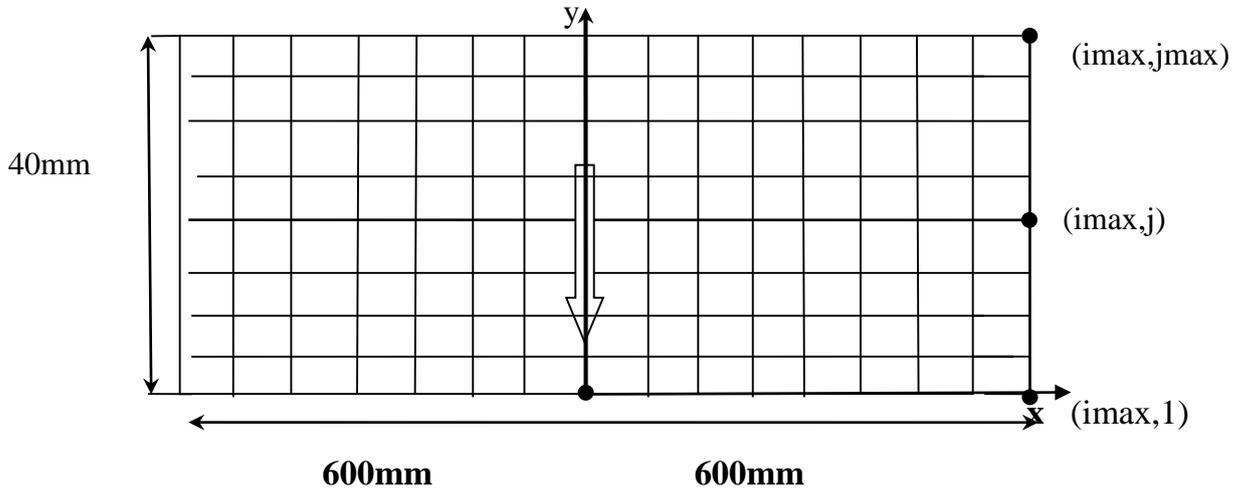


Figure II 2 : schéma des nœuds de maillage

Nous allons prendre en considération :

- La perte de chaleur par rayonnement thermique ;
- La perte de chaleur par convection ;
- Le déplacement du faisceau laser avec une vitesse constante
- L'étude se fera en deux dimensions.

II-3-2- Application de la Méthode des Différences Finies aux points du maillage

Par l'application des dérivées partielles dans les équations de la chaleur et le flux de chaleur, nous obtenons les équations suivantes :

- Pour la phase solide :

$$\rho_s c p_s \left(\frac{T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j)}^n}{ht} \right) = \lambda_L \left(\frac{T_{(i-1,j)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}}{(hx)^2} + \frac{T_{(i,j-1)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}}{(hy)^2} \right) + Q_{i,j,t} - \quad (II.17)$$

$$\sigma(T_{(i,j,t)}^{(n+1)} - T_{\infty}^4) - h(T_{(i,j,t)}^{n+1} - T_{\infty}^{n+1})$$

- Pour la transition de phase solide - liquide :

$$\varphi = \left(\frac{T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}}{hx} + \frac{T_{(i,j)}^{n+1} - T_{(i,j+1)}^{n+1}}{hy} \right) - \sigma(T_{(i,j)}^{(n+1)4} - T_{\infty}^4) - h(T_{(i,j)}^{n+1} - T_{\infty}^{n+1}) \quad (\text{II.18})$$

- Pour la phase liquide :

$$\rho_L c p_L \left(\frac{T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j)}^n}{ht} \right) = \lambda_L \left(\frac{T_{(i-1,j)}^{n+1} + 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}}{(hx)^2} + \frac{T_{(i,j-1)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}}{(hy)^2} \right) + Q_{i,j,t} - \sigma(T_{(i,j,t)}^{(n+1)4} - T_{\infty}^4) - h(T_{(i,j,t)}^{n+1} - T_{\infty}^{n+1}) \quad (\text{II.19})$$

Ces équations sont applicables pour les états $j = 2, j_{\max}-1$ et $i=2, i_{\max}-1$.

- Pour la phase solide :

$$\alpha_1 T_{(i-1,j)}^{n+1} - T_{(i,j)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(i,j)}^{(n+1)3}) + \alpha_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n - \alpha_2 (T_{(i,j-1)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}) - \alpha_5 Q_{(i,j)} - \beta_1 \quad (\text{II.20})$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_m ht}{\rho c p h x^2} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_m ht}{\rho c p h y^2} \quad \alpha_3 = \frac{\sigma ht hx hy}{\rho c p} \quad \alpha_4 = \frac{H ht hx hy}{\rho c p}$$

$$\alpha_5 = \frac{ht}{\rho c p} \quad \beta_1 = \alpha_3 T_{\infty}^{(n+1)4} + \alpha_4 T_{\infty}^{n+1}$$

- changement de phase solide - liquide :

$$d\varphi_{(i,j)} = 2\gamma_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} - T_{(i-1,j)}^{n+1} (1 + 2\gamma_1 + 2\gamma_2 + \gamma_4 + \gamma_3 T_{(i,j)}^{(n+1)3}) + \gamma + 2\gamma_1 T_{(i,j+1)}^{n+1} \quad (\text{II.21})$$

$$\gamma_1 = \frac{\lambda_m hy}{hx} \quad \gamma_2 = \frac{\lambda_m hx}{hy} \quad \gamma_3 = \sigma hx hy \quad \gamma_4 = h hx hy \quad \gamma = \gamma_3 T_{\infty}^{(n+1)4} + \gamma_4 T_{\infty}^{n+1}$$

- Phase liquide :

$$\alpha_6 T_{(i-1,j)}^{n+1} - T_{(i,j)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + 2\alpha_7 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(i,j)}^{(n+1)3}) + \alpha_6 T_{(i+1,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n - \alpha_7 (T_{(i,j-1)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}) - \alpha_{10} Q_{(i,j)} - \beta_2 \quad (\text{II.22})$$

II-3-1- Conditions initiales et conditions aux limites :

Pour les conditions initiales et les conditions aux limites nous proposons :

1^{er} cas : les états j=1 et i=2, imax-1

- Pour la phase solide :

$$\begin{aligned} \alpha_1 T_{(i-1,j)}^{n+1} - T_{(i,1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(i,1)}^{(n+1)^3}) + \alpha_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} = -\alpha_1 T_{(i+1,2)}^{n+1} + T_{(i,2)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 \\ + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(i,2)}^{(n+1)^3}) - \alpha_1 (T_{(i-1,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}) - T_{(i,2)}^n - T_{(i,1)}^n \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

- Changement de phase solide- liquide :

$$\begin{aligned} d\varphi_{(i,1)} = \gamma_1 (T_{(i+1,1)}^{n+1} + T_{(i+1,2)}^{n+1}) - T_{(i,1)}^{n+1} (\gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(i,1)}^{(n+1)^3}) + 2\gamma_2 T_{(i,2)}^{n+1} - T_{(i,2)}^{n+1} (1 + \gamma_1 \\ + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(i,2)}^{(n+1)^3}) + \gamma \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

- Phase liquide :

$$\begin{aligned} \alpha_6 T_{(i-1,j)}^{n+1} - T_{(i,1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(i,1)}^{(n+1)^3}) + \alpha_6 T_{(i+1,j)}^{n+1} = -\alpha_6 T_{(i+1,2)}^{n+1} + T_{(i,2)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 \\ + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(i,2)}^{(n+1)^3}) - \alpha_6 (T_{(i-1,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}) - T_{(i,2)}^n - T_{(i,1)}^n \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

2^{ème} cas : l'état j=1 et i = 1

- Pour la phase solide :

$$\begin{aligned} 2\alpha_1 T_{(2,1)}^{n+1} - T_{(1,1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(1,1)}^{(n+1)^3}) = 2\alpha_1 T_{(2,2)}^{n+1} + T_{(1,2)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(1,2)}^{(n+1)^3}) \\ - T_{(1,1)}^n - T_{(1,2)}^n - 2\beta_1 - 2\alpha_3 Q_{(1,1)} \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

- Changement de phase solide - liquide :

$$\begin{aligned} d\varphi_{(1,1)} = -\gamma_1 (T_{(2,1)}^{n+1} + T_{(2,2)}^{n+1}) - T_{(1,1)}^{n+1} (\gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(1,1)}^{(n+1)^3}) + T_{(1,2)}^{n+1} (1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} \\ + \frac{\gamma_3}{2} T_{(1,2)}^{(n+1)^3}) + 2\gamma_2 T_{(1,2)}^{n+1} + \gamma \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

- Phase liquide :

$$\begin{aligned} 2\alpha_6 T_{(2,1)}^{n+1} - T_{(1,1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(1,1)}^{(n+1)^3}) = 2\alpha_6 T_{(2,2)}^{n+1} + T_{(1,2)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(1,2)}^{(n+1)^3}) \\ - T_{(1,1)}^n - T_{(1,2)}^n - 2\beta_2 - 2\alpha_{10} Q_{(1,1)} \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

3^{ème} cas : l'état $j= 1$ et $i = i_{\max}$:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$T_{(i_{\max}, j_{\max})}^{n+1} = T_{(i_{\max}, j_{\max}-1)}^{n+1} \quad (\text{II.29})$$

4^{ème} cas : l'état $j= j_{\max}$ et $i = 1$:

- Pour la phase solide :

$$2\alpha_1 T_{(1, j_{\max})}^{n+1} - T_{(1, j_{\max})}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(1, j_{\max})}^{(n+1)^3}) = 2\alpha_1 T_{(2, j_{\max}-1)}^{n+1} + T_{(2, j_{\max}-1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(2, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) - T_{(1, j_{\max})}^n - T_{(2, j_{\max}-1)}^n - 2\beta_1 - 2\alpha_5 Q_{(1, j_{\max})} \quad (\text{II.30})$$

- Changement de phase solide- liquide :

$$d\varphi_{(1, j_{\max})} = -\gamma_1 T_{(1, j_{\max})}^{n+1} - \gamma_1 T_{(1, j_{\max}-1)}^{n+1} + \gamma - T_{(1, j_{\max})}^{n+1} (\gamma_1 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(1, j_{\max})}^{(n+1)^3}) - T_{(1, j_{\max}-1)}^{n+1} (\gamma_1 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(1, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) \quad (\text{II.31})$$

- Phase liquide :

$$2\alpha_6 T_{(1, j_{\max})}^{n+1} - T_{(1, j_{\max})}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(1, j_{\max})}^{(n+1)^3}) = 2\alpha_6 T_{(2, j_{\max}-1)}^{n+1} + T_{(2, j_{\max}-1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(2, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) - T_{(1, j_{\max})}^n - T_{(2, j_{\max}-1)}^n - 2\beta_2 - 2\alpha_{10} Q_{(1, j_{\max})} \quad (\text{II.32})$$

5^{ème} cas : l'état $j= j_{\max}$ et $i = 2$ à $i_{\max}-1$:

- Pour la phase solide :

$$\alpha_1 T_{(i-1, j_{\max})}^{n+1} - T_{(i, j_{\max})}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(i, j_{\max})}^{(n+1)^3}) + \alpha_1 T_{(i+1, j_{\max})}^{n+1} = \alpha_1 T_{(i-1, j_{\max}-1)}^{n+1} + T_{(i, j_{\max}-1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_1 + \alpha_4 + \alpha_3 T_{(i, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) - \alpha_1 T_{(i+1, j_{\max}-1)}^{n+1} - T_{(i, j_{\max})}^n - T_{(i, j_{\max}-1)}^n - 2\beta_1 - 2\alpha_5 Q_{(i, j_{\max})} \quad (\text{II.33})$$

- Changement de phase solide- liquide :

$$d\varphi_{(i, j_{\max})} = -\gamma_1 (T_{(i+1, j_{\max})}^{n+1} + T_{(i+1, j_{\max}-1)}^{n+1}) - T_{(i, j_{\max})}^{n+1} (1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(i, j_{\max})}^{(n+1)^3}) - T_{(i, j_{\max}-1)}^{n+1} (\gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\gamma_4}{2} + \frac{\gamma_3}{2} T_{(i, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) + \gamma \quad (\text{II.34})$$

- Phase liquide :

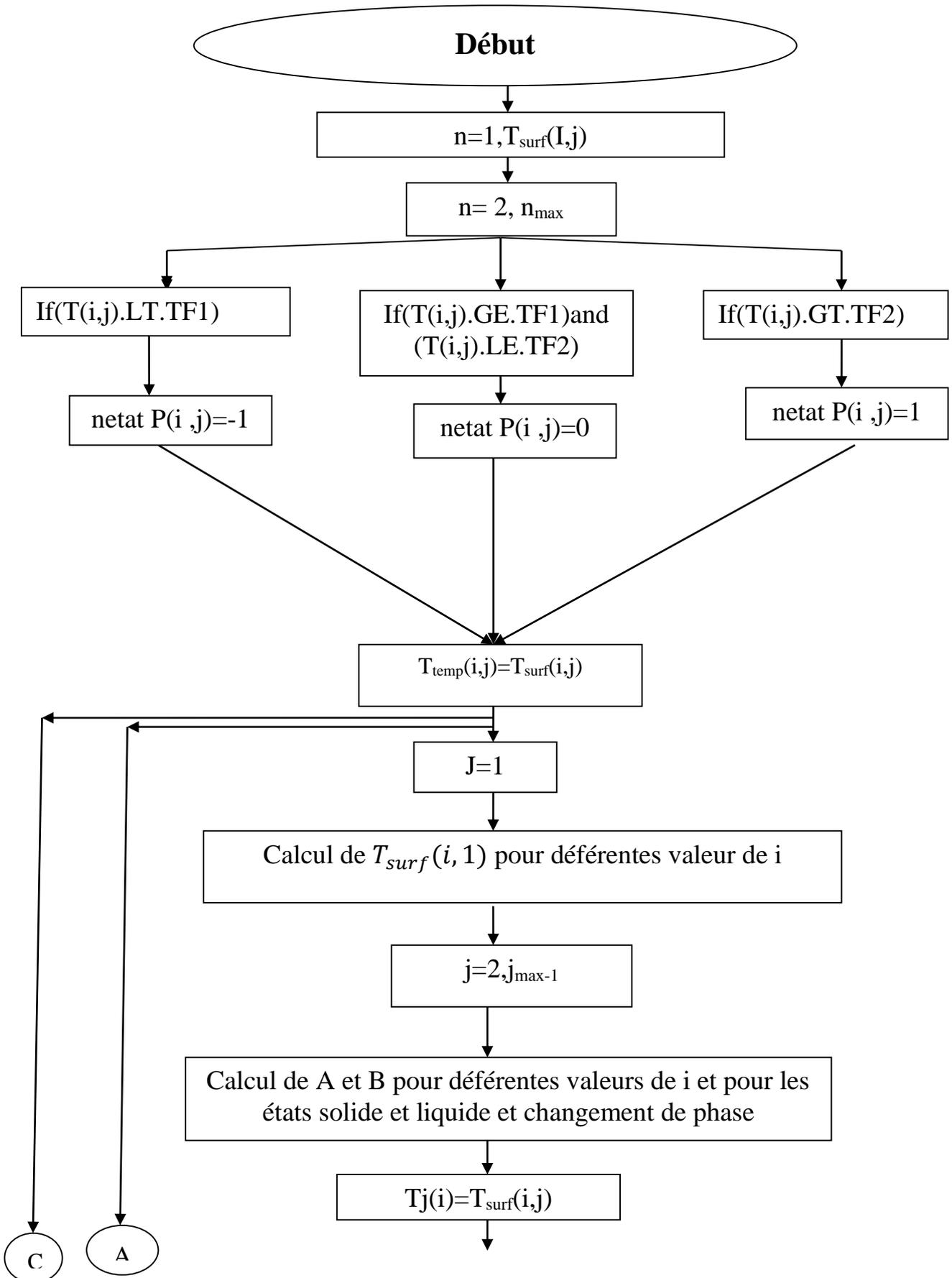
$$\alpha_6 T_{(i-1, j_{\max})}^{n+1} - T_{(i, j_{\max})}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(i, j_{\max})}^{(n+1)^3}) + \alpha_6 T_{(i+1, j_{\max})}^{n+1} = \alpha_6 T_{(i-1, j_{\max}-1)}^{n+1} + T_{(i, j_{\max}-1)}^{n+1} (1 + 2\alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_8 T_{(i, j_{\max}-1)}^{(n+1)^3}) - \alpha_6 T_{(i+1, j_{\max}-1)}^{n+1} - T_{(i, j_{\max})}^n - T_{(i, j_{\max}-1)}^n - 2\beta_2 - 2\alpha_{10} Q_{(i, j_{\max})} \quad (\text{II.35})$$

6^{ème} cas : l'état $j = j_{\max}$ et $i = i_{\max}$:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0$$

$$T_{(i_{\max}, j_{\max})}^{n+1} = T_{(i_{\max}, j_{\max}-1)}^{n+1} \quad (\text{II.36})$$

II.4. Organigramme de calcul de température :



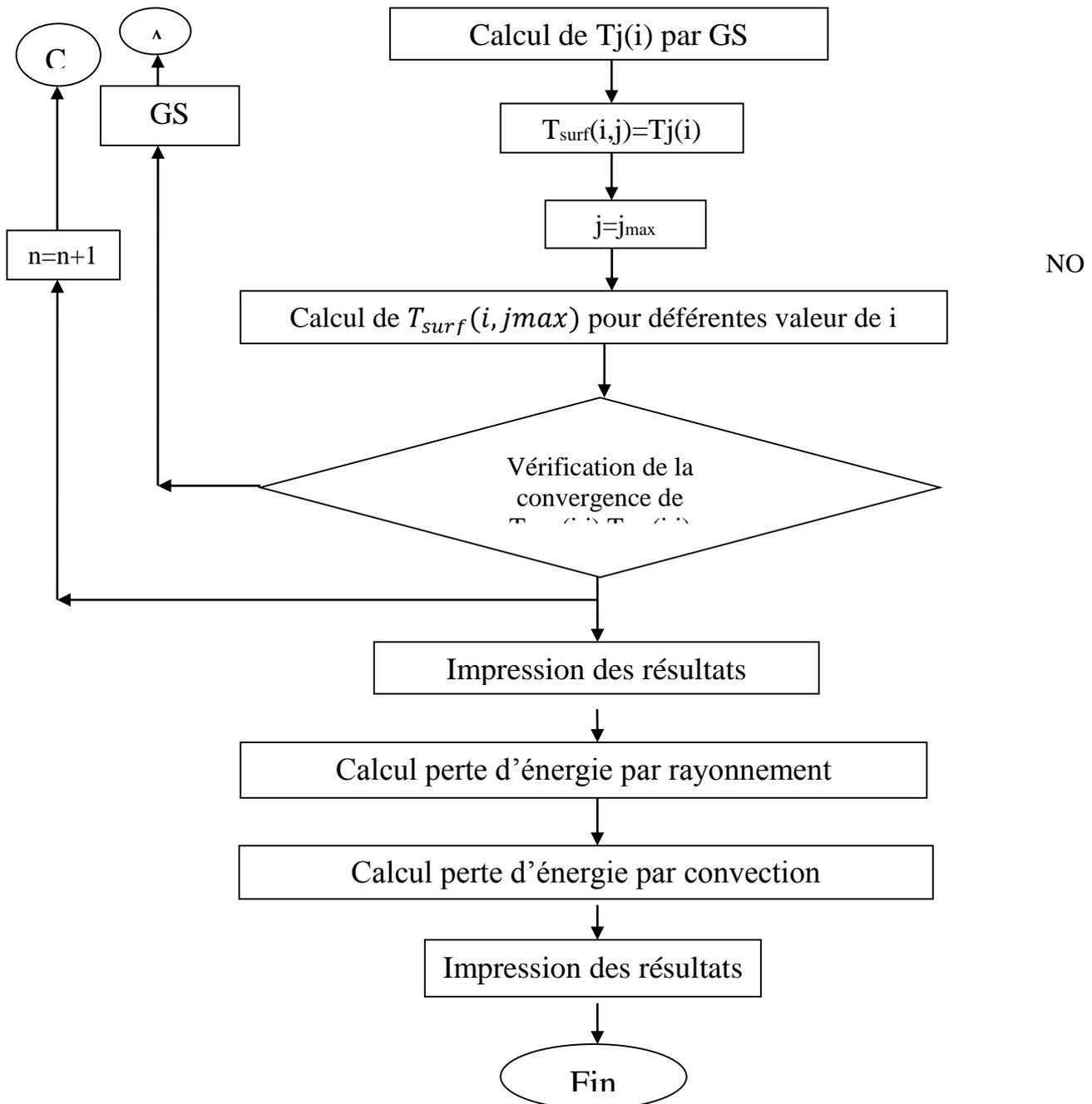


Figure II 3 : Organigramme de calcul de la température



CHAPITRE III

Chapitre III : Résultats et discussion

III-1- Données physiques et numériques de l'opération de soudage

III-1-1- L'alliage de titane Ti-6Al-4V :

L'alliage de Ti-6Al-4V, anciennement appelé TA6V, est le plus couramment utilisé. Il représente à lui seul 50 % du marché. Cet alliage présente une structure mixte $\alpha+\beta$ (figure 2.1), stabilisée par l'aluminium (6%), élément α -gène et le vanadium (4%), élément β -gène. L'aluminium durcit la phase α en améliorant la résistance mécanique et la tenue au fluage, mais son pourcentage est limité à 7% pour éviter des précipitations locales de phase α_2 fragilisant tel que le Ti3Al [Combres, 1999 ; Lütjering & Williams, 2003]. Le vanadium améliore la ductilité mais diminue la tenue à l'oxydation. Le tableau III-1 présente les propriétés physiques de TA6V utilisées dans nos calculs [5].

Tableau III-1 : Les propriétés physiques[1] de TA6V utilisées dans les calculs .

Grandeurs physiques	unité	Symbole / Valeur
Température du Fusion	(K)	T _s = 1923
Température du Vaporization	(K)	T _L = 1993
Densité (solide)	(kg/m ³)	ρ_s = 4500
Densité (liquide)	(kg/m ³)	ρ_l = 4100
La capacité calorifique (solide)	(J/(kg· K))	C _{ps} = 610
La capacité calorifique (liquide)	(J/(kg· K))	C _{pl} =720
La conductivité thermique (solide)	(W/(m· K))	K _s = 20
La conductivité thermique (liquide)	(W/(m· K))	K _l = 35
La conductivité thermique solide – liquide	K	K ₂ =27.5

Les dimensions de la surface étudiée sont pour chaque plaque : 600 mm x 40 mm. Pour les paramètres de soudage, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

- ❖ Longueur d'onde 10.6 μ m.
- ❖ Puissance du laser : 4 ,22 kW.
- ❖ Diamètre du laser : 0,4 mm

III-2- Vérification des équations et du programme :

Les figures III.1 et III.2 présentent les variations de température en fonction du temps en l'absence et en présence de rayonnement thermique et de la convection respectivement. La

figure III.3 présente la variation de la température en fonction du temps au point ($x=0\text{mm}$, $y=5.2\text{mm}$) en l'absence et en présence de rayonnement thermique et de la convection, au niveau de cordon de soudure.

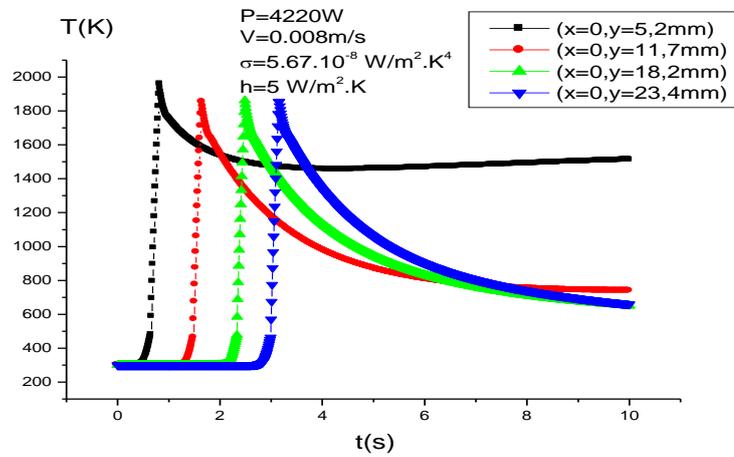


Figure III 1 : Variation de la température en fonction du temps en présence de la perte de chaleur par rayonnement et par convection

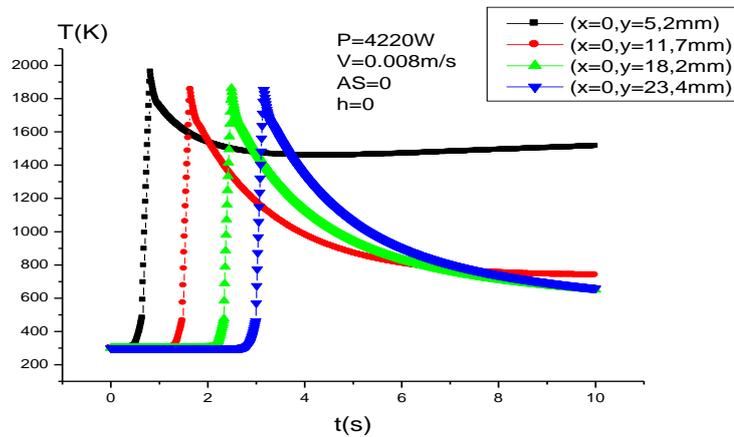


Figure III 2 : Variation de la température en fonction du temps en l'absence de rayonnement thermique et la convection

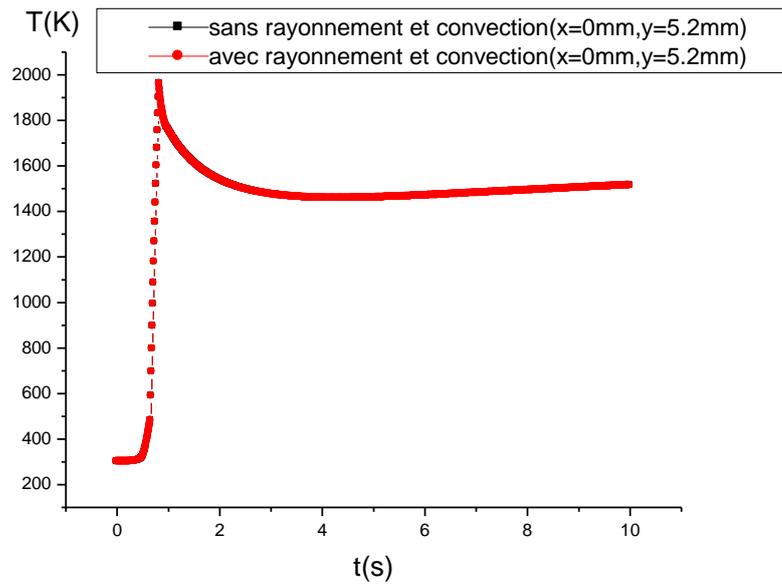


Figure III 3 : Comparaison entre les deux premières courbes sans et avec perte de chaleur par rayonnement et par convection

Le tableau III 2 présente des comparaisons entre les deux courbes de la figure III.3.

Tableau III 2 : Variation de la température avec perte par rayonnement et sans perte par rayonnement

Temps	$T_{ray}(\sigma=0, h=0)$	$T_{ray}(\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4, h=5 W/m^2 \cdot K^4)$	$\Delta T/T_{ray}$
t=0s	300	300	0%
t=0.71s	991.2852	991.2851	$10^{(-5)}\%$
t=5.03s	1459.204	1459.203	$7 \cdot 10^{(-5)}\%$
t=10s	1512.85	1512.859	$5.9 \cdot 10^{(-4)}\%$

Au niveau du cordon de soudure, il y a un grand accord entre les deux courbes ; les pertes de chaleur par rayonnement et par convection sont négligeables et ne dépassent pas les $10^{-5}\%$ au bout de 10s. Ce résultat est en accord avec les résultats de J. Zhou, et al. (2006) [12].

III-3- Distributions des températures

III-3-1- Variations des températures en fonction du temps

Les figures III.4 à III.6 présentent la variation des profils de la température suivant l'axe X dans des positions différentes de Y et pour des puissances P=2900W, 3300W, 4200W.

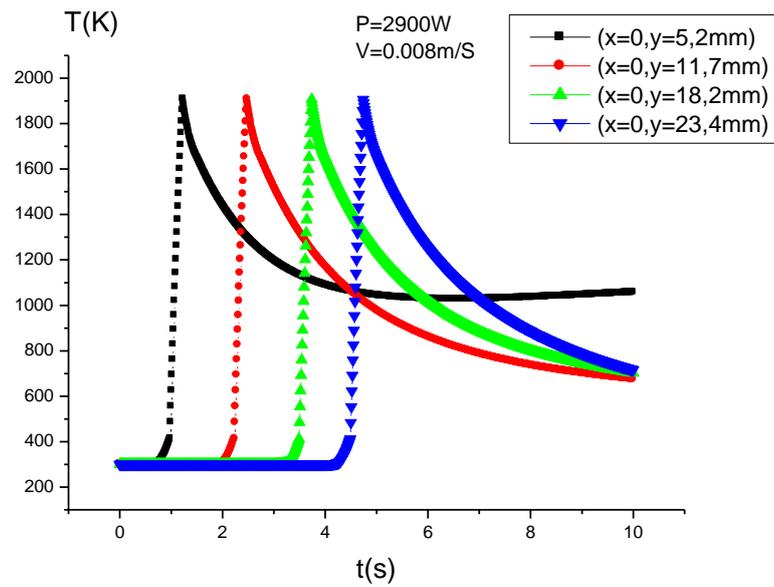


Figure III 4 : Variation de la température en fonction du temps à $P=2900W$

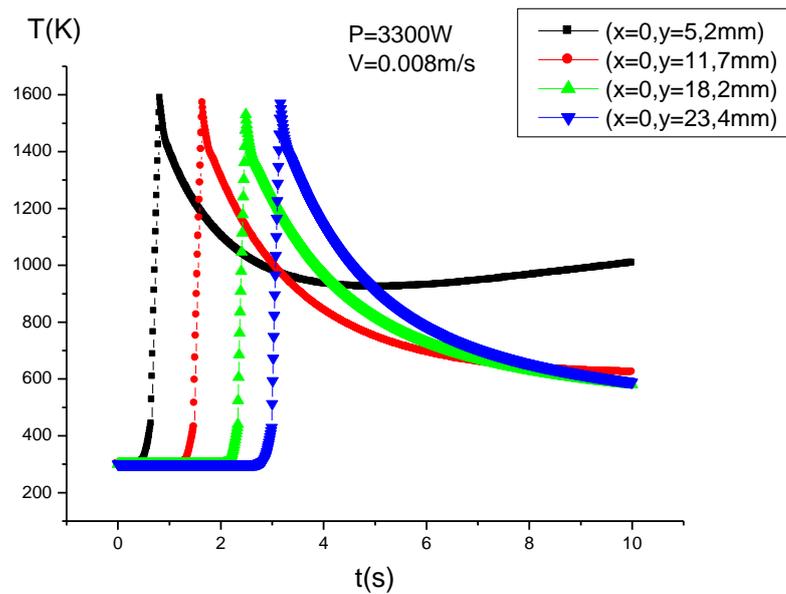


Figure III 5 : Variation de La température en fonction du temps à $P=3300W$

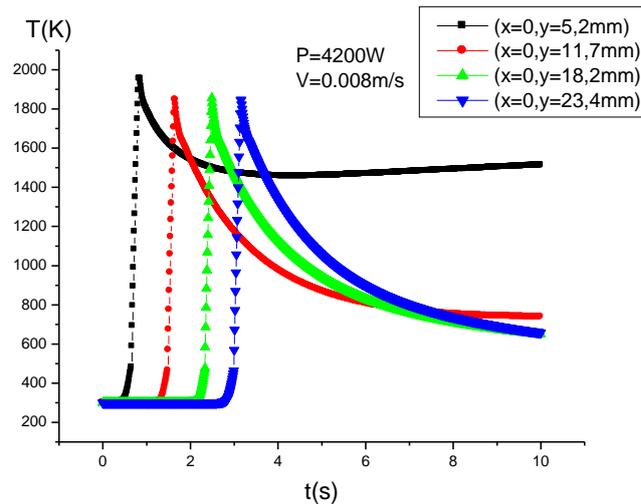


Figure III 6 : Variation de la température fonction le temps à P=4200W

Tableau III 3 : le pourcentage de variation de la température en fonction de la puissance

	T(P=2500W)	T(P=4200W)	($\Delta T/T$) %
$T_{\max}(x=0,y=5.2)mm$	1687,559	1913,373	6.26%
$T_{\max}(x=0,y=11.7)mm$	1685,356	1846,499	6.20%
$T_{\max}(x=0,y=18.2)mm$	1685,353	1830,602	9.48%
$T_{\max}(x=0,y=23.4)mm$	1685,336	1800,288	9.36%

- On remarque que la puissance affecte la température maximale.

Les figures III-7 à III-9 présentent les variations de température en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse.

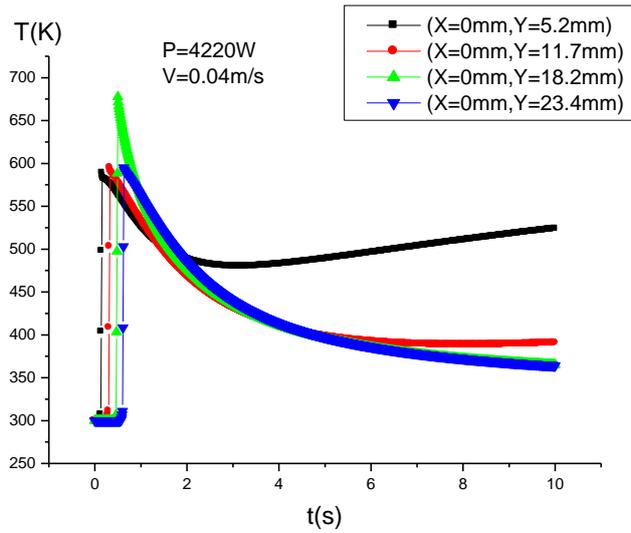


Figure III 7 : Variation de la température en fonction du temps pour $V=0.04m/s$

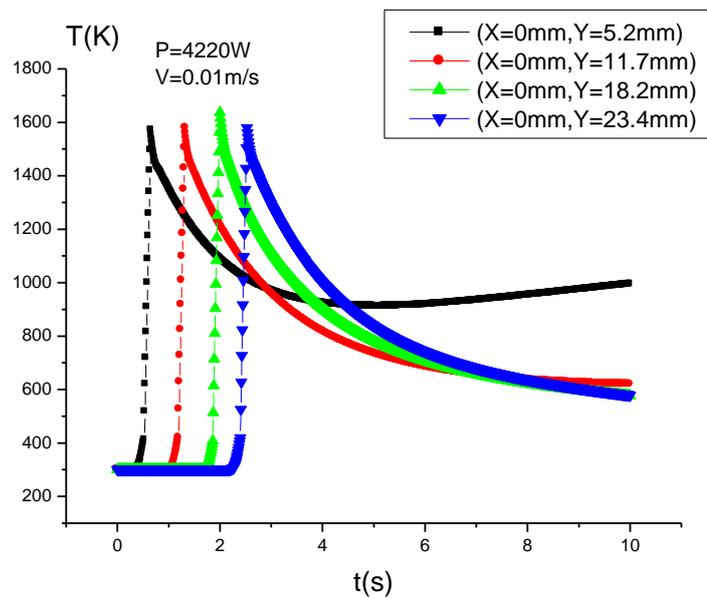


Figure III 8 : Variation de la température en fonction du temps pour $V=0.01m/s$

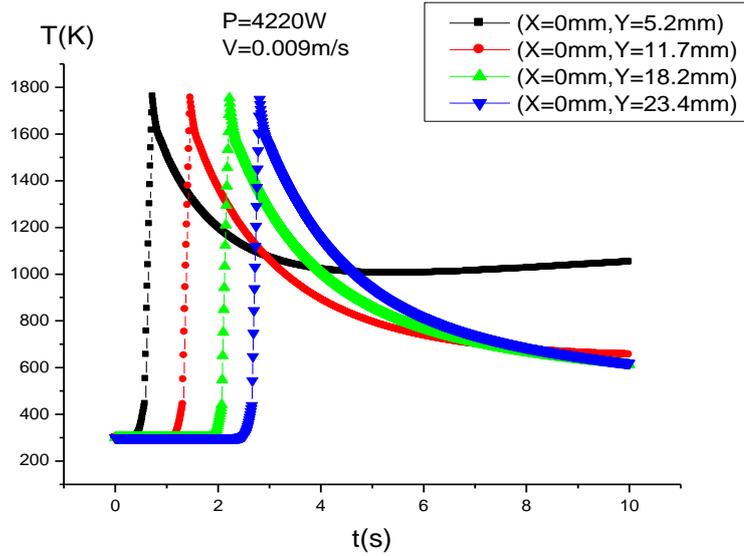


Figure III 9 : Variation de la température en fonction du temps pour $V=0.009\text{m/s}$

Nous remarquons que si la vitesse augmente, les températures maximales diminuent ; pour les vitesses $V=0.04\text{m/s}$ et $V=0.01\text{m/s}$ la température de fusion n'est pas atteinte.

III-3-2- Températures à la surface pour différents instants

a) Variation de la température Lors du soudage

Les figures III.10 à III.13 montrent la variation de température en fonction de la position, en présence d'un rayonnement thermique et convection en fonction de temps pour $V=0.008\text{m/s}$ et $P=4220\text{W}$.

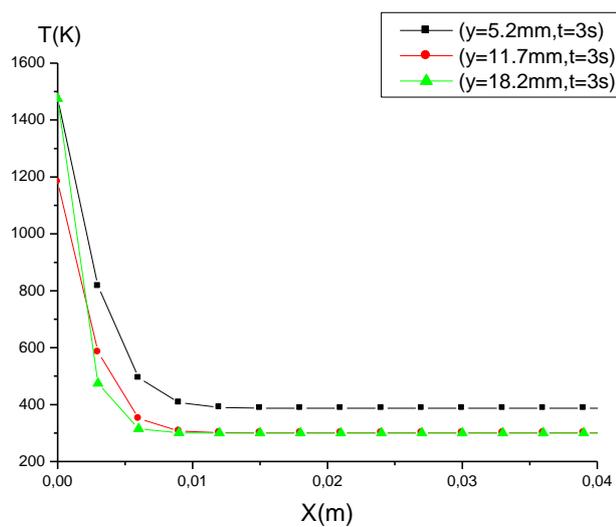


Figure III 10 : Variation de la température en fonction de la position X durant la période de soudage

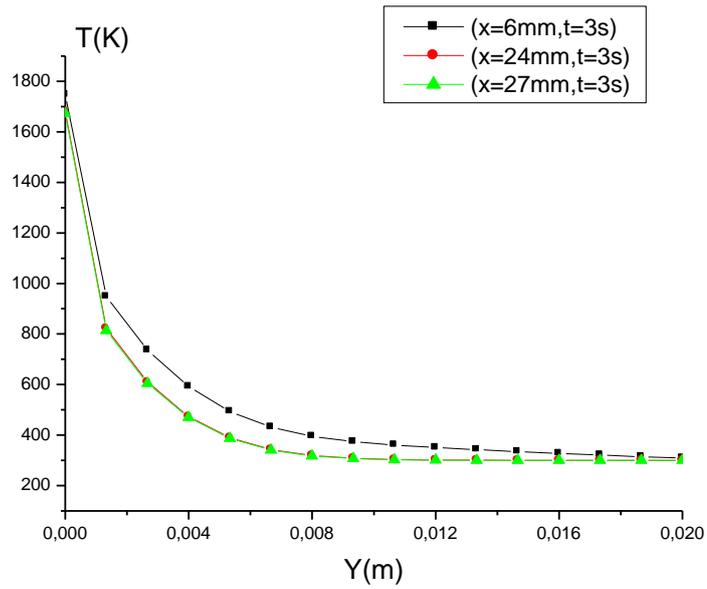


Figure III 11 : Variation de la température en fonction de la position Y durant la période de soudage

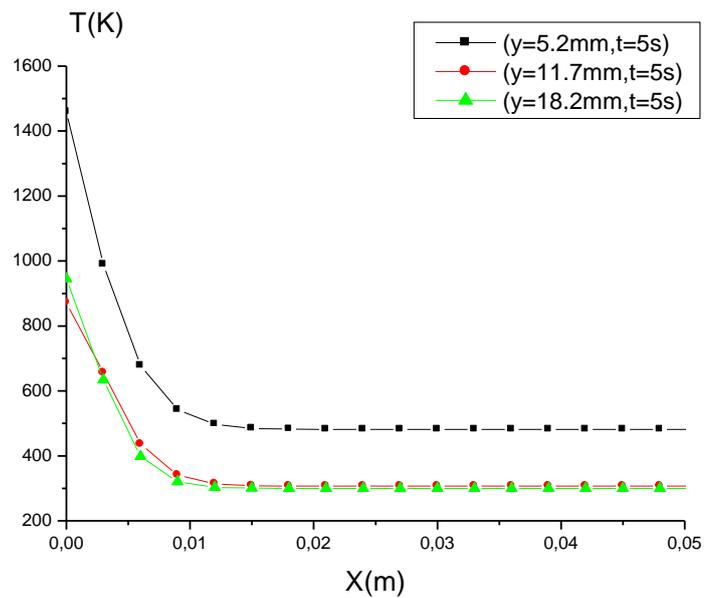


Figure III 12 : Variation de la température en fonction de la position X à la fin de la soudure

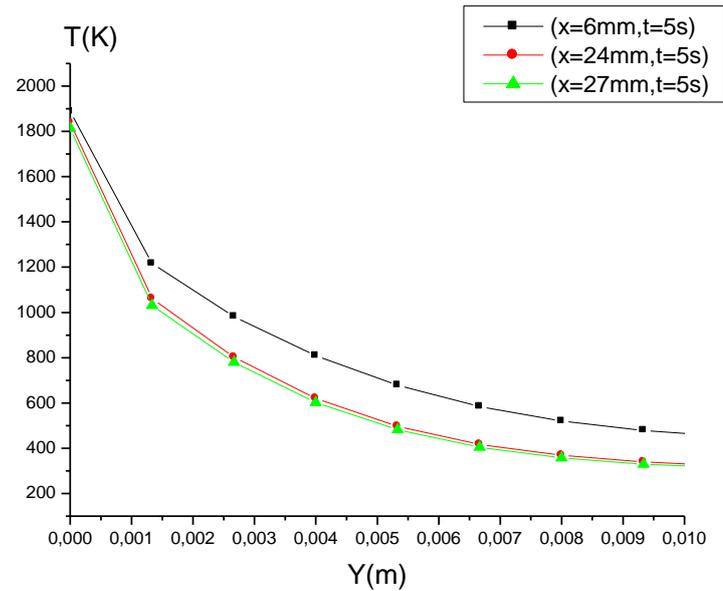


Figure III 13 : Variation de la température en fonction de position Y à la fin de la soudure
b) Variation de la température lors du refroidissement

Les figures III.14 à III.15 montrent la variation de température en fonction de la position, en présence du rayonnement thermique et la convection pour $V=0.008\text{m/s}$ et $P=4220\text{W}$.

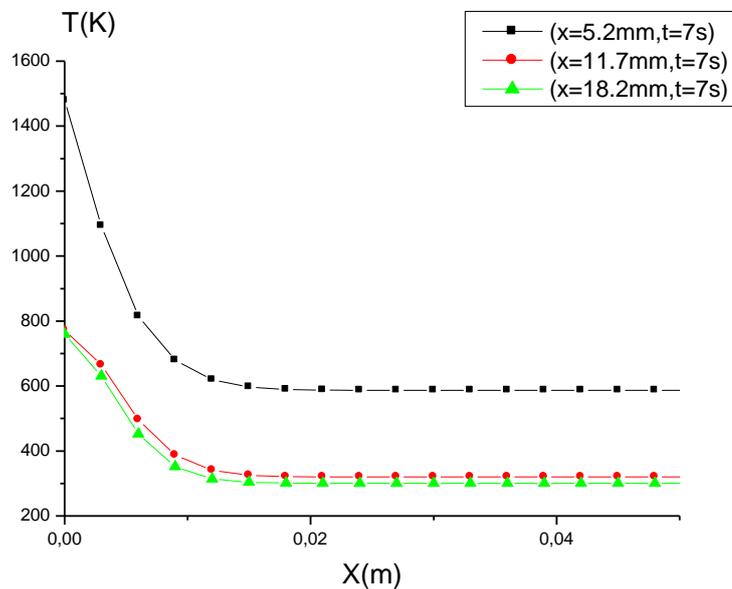


Figure III 14 : Variation de la température en fonction de position X pendant le refroidissement

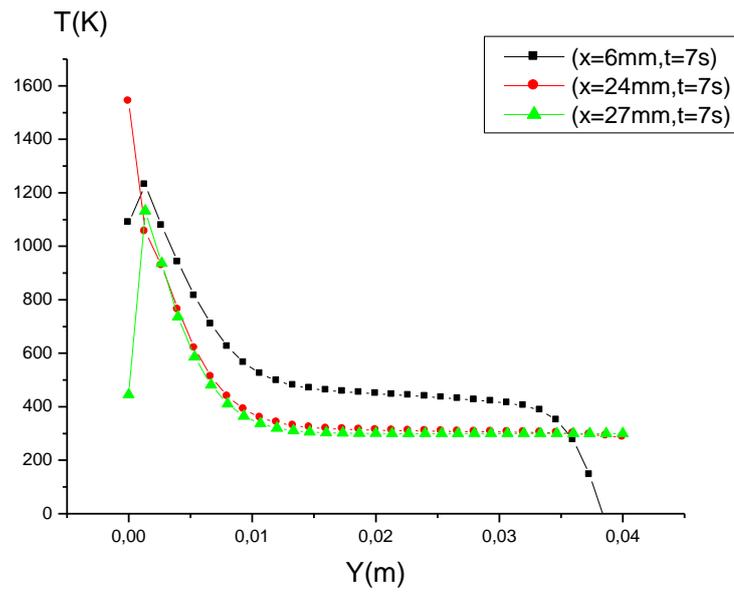


Figure III 15 : Variation de la température en fonction de position Y pendant le refroidissement

III-4- Calcul des pertes par rayonnement thermique

Les figures III.16 III.20 montrent la quantité d'énergie perdue par rayonnement thermique en fonction du temps et la position pour $V=0.008\text{m/s}$ et $P=4220\text{W}$.

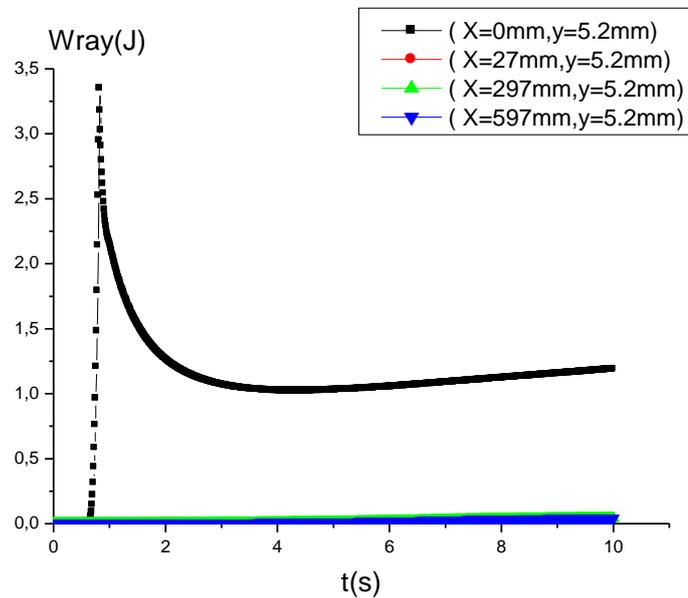


Figure III 16 : La quantité d'énergie perdue par rayonnement thermique en fonction du temps

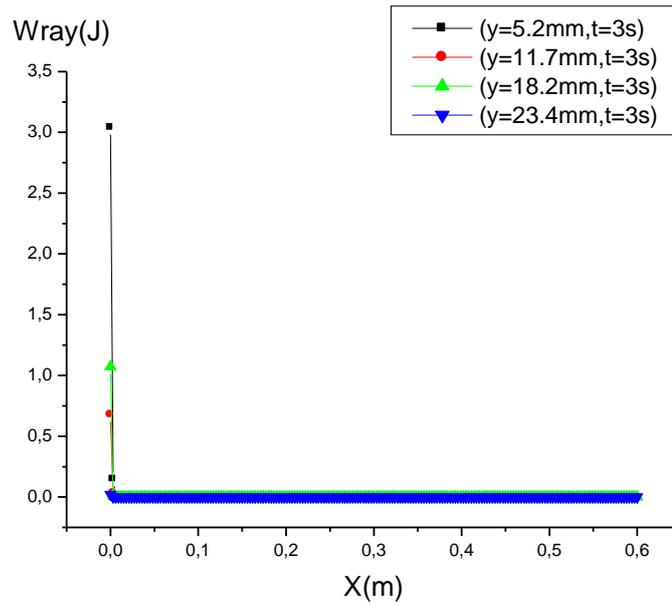


Figure III.17 : La quantité d'énergie de rayonnement thermique perdue par la position X pendant le soudage

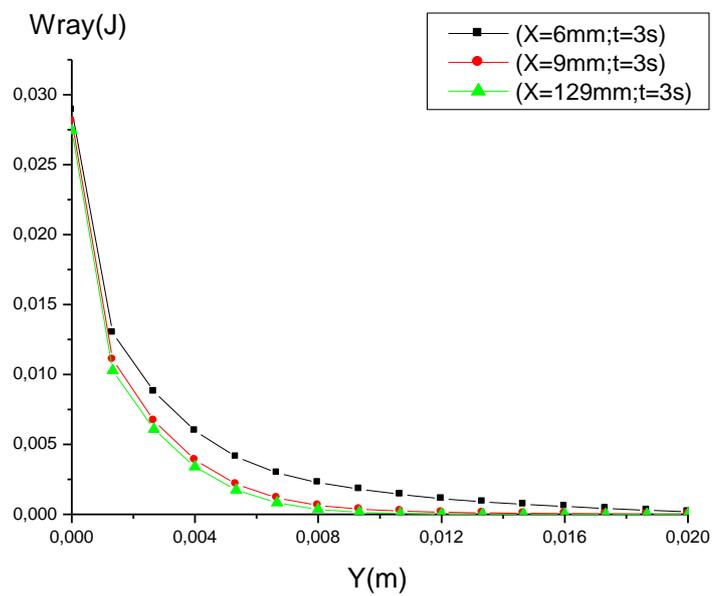


Figure III.18 : La quantité d'énergie de rayonnement thermique perdue par la position Y pendant le soudage

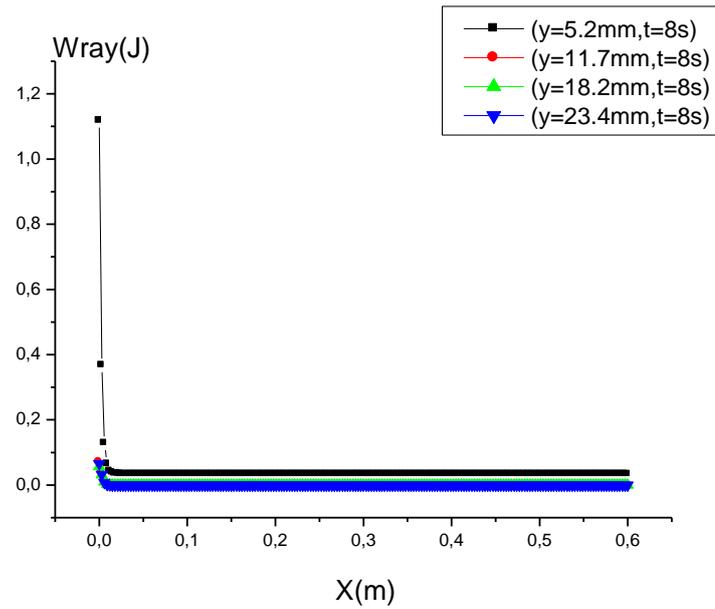


Figure III.19 : La quantité d'énergie du rayonnement thermique perdue en fonction de la position X pendant le refroidissement

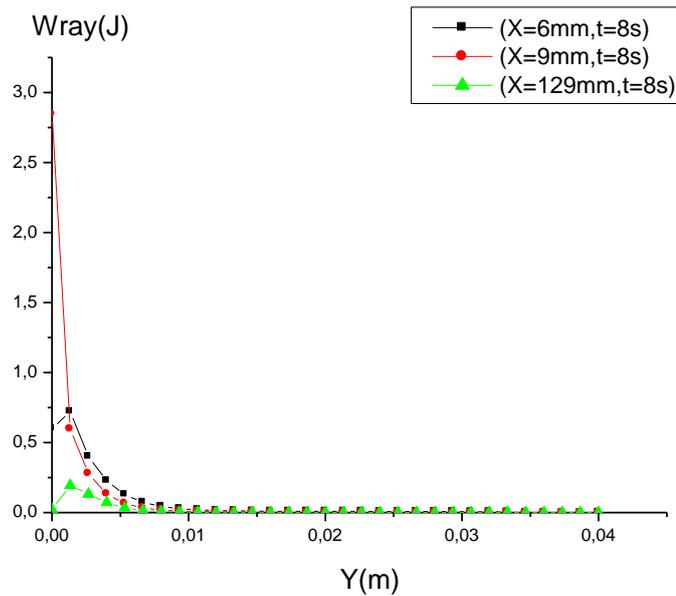


Figure III 20 : La quantité d'énergie perdue par rayonnement pour les positions Y pendant le refroidissement

III-5- Calcul des pertes par convection

Les figures III.21 III.25 montrent l'énergie perdue par convection en fonction de la position et du temps.

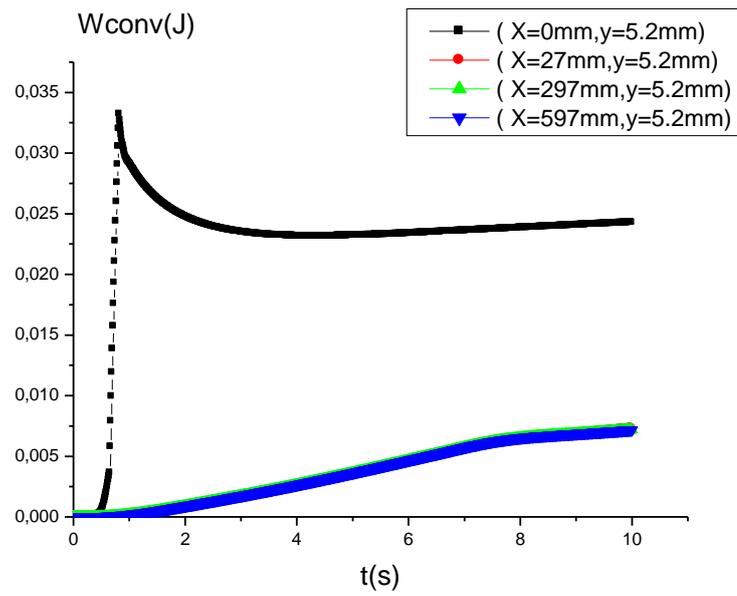


Figure III 21 : La quantité d'énergie perdue par convection en fonction du temps

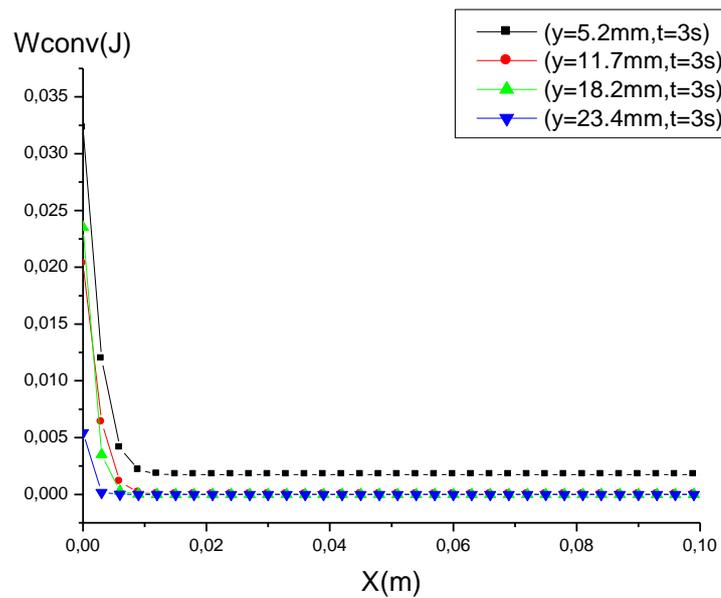


Figure III 22 : La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position X pendant le soudage

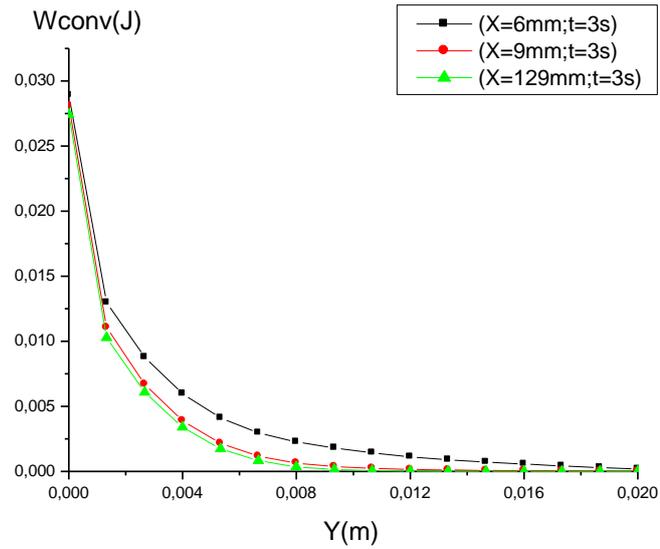


Figure III 23 : La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position Y pendant le soudage

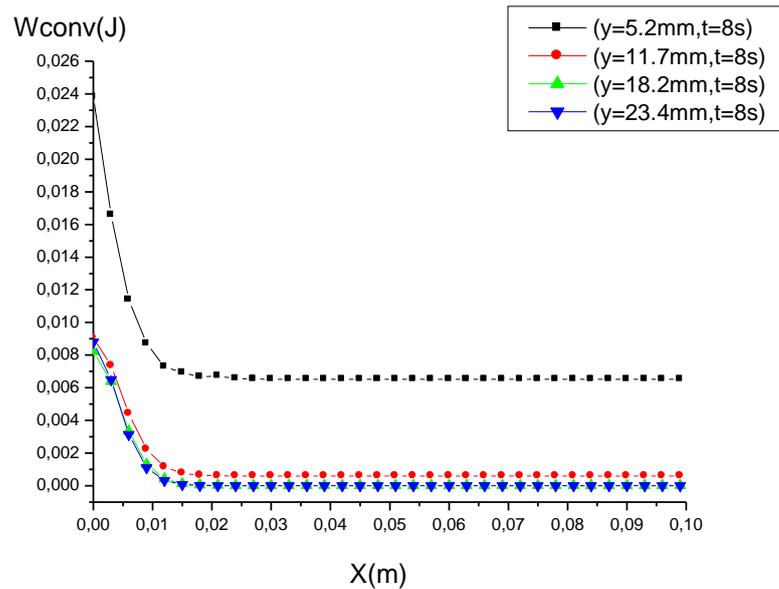


Figure III 24 : La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position X, durant le refroidissement

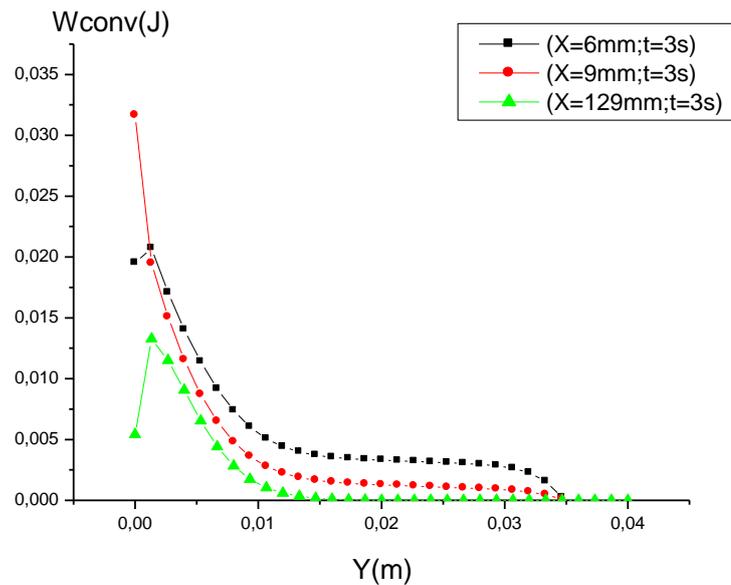


Figure III 25 : La quantité d'énergie perdue par convection en fonction de la position Y durant le refroidissement

III-6- Comparaison entre les pertes par rayonnement et par convection

Les figures III.26 à III.29 montrent les quantités d'énergie perdues par rayonnement et par convection thermique en fonction de la position et du temps.

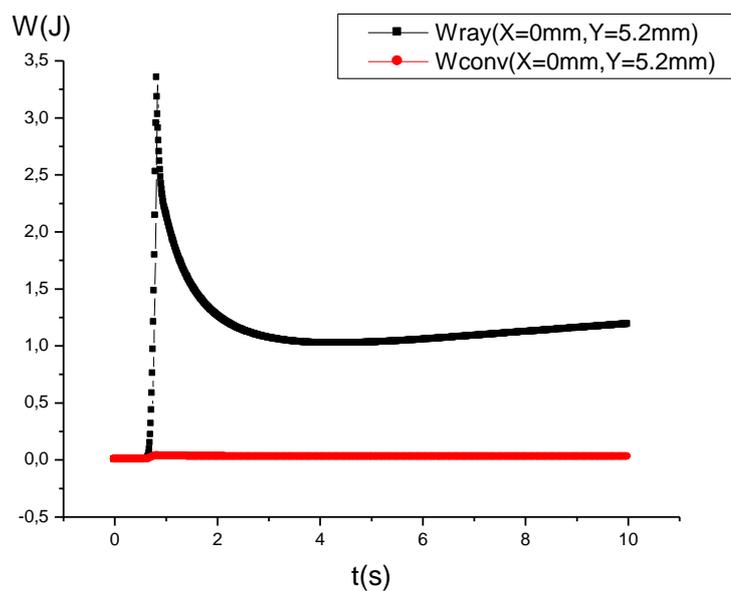


Figure III 26 : Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction du temps

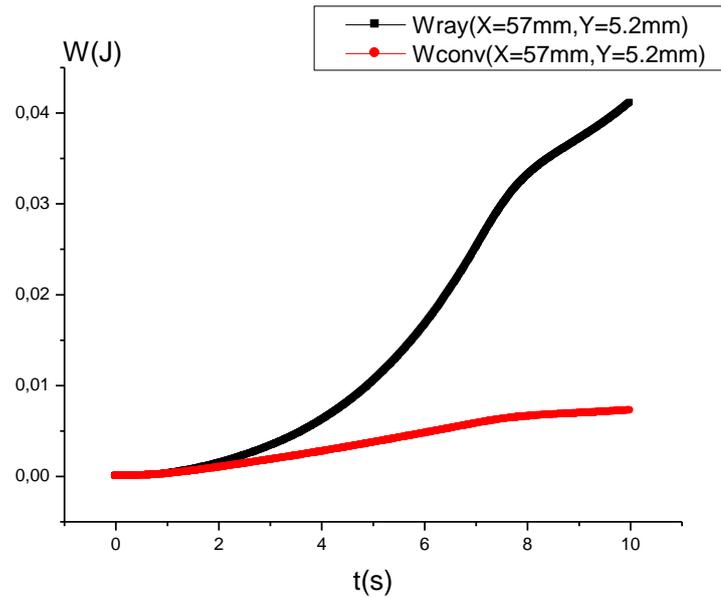


Figure III 27 : Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction du temps

Table III 4 : Pourcentage du rayonnement thermique perdu par rapport à la convection :

Point	(1,5)	(3,5)	(10,5)	(100 ,5)	(200,5)
W_{ray}	256477	11524,16	2587,976	2587,915	2587,915
W_{conv}	5795,089	1894 ,361	907,4159	907,4039	907,4039
$W_{ray}+W_{conv}$	262272,09	13418,521	3495,3919	3495,3189	3495,3189
$W_{ray}/(W_{ray}+W_{conv}) \%$	97,8%	85,9%	74%	74%	74%

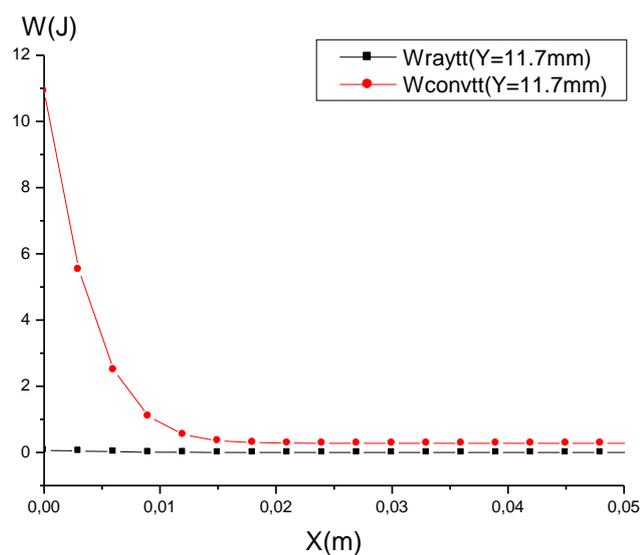


Figure III 28 : Variation des énergies perdues par rayonnement et par convection en fonction des positions X.

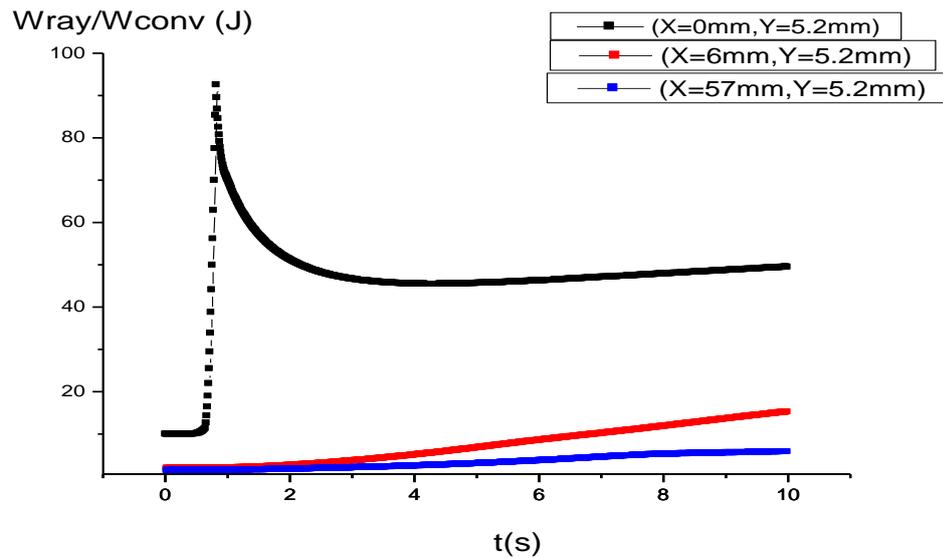


Figure III 29 : Variation du rapport des énergies perdues en fonction temps

III-7- Rayonnement thermique en fonction de longueur d'onde :

La figure III.30 présente le courbe de la variation de la longueur d'onde maximale en fonction du temps pour différents points du cordon de soudure.

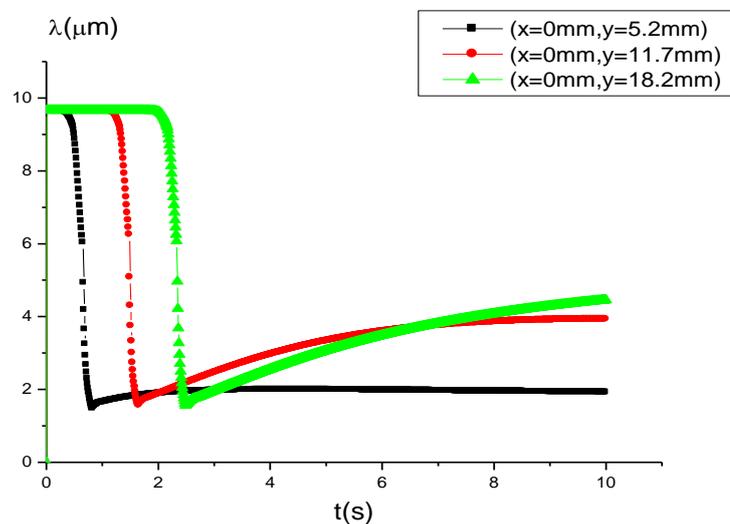


Figure III 30 : Variation la longueur d'onde maximale en fonction du temps

La figure III.31 présente la variation de la densité spectrale du rayonnement en fonction de la longueur d'onde pour différents points du cordon de soudure.

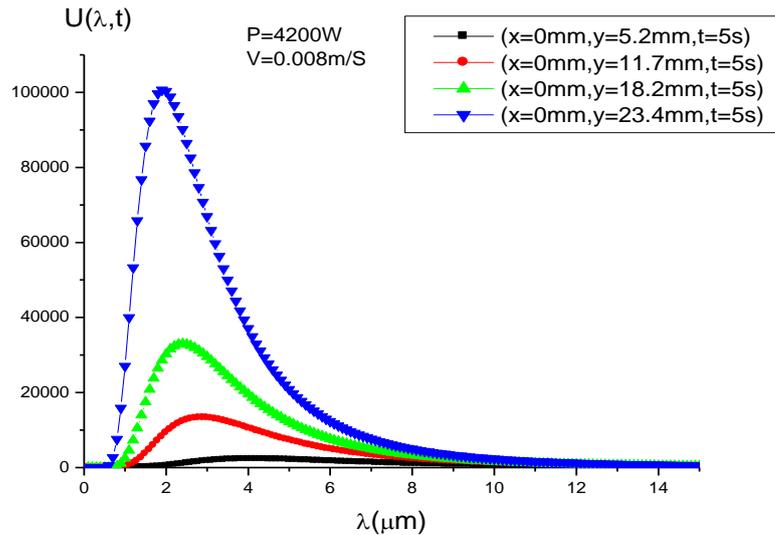


Figure III 31 : Variation de la densité d'énergie en fonction de la longueur d'onde.

III-8- Calcul du bilan énergétique :

L'énergie du laser durant toute la phase de la soudure est :

$$W_{\text{laser}} = P \cdot t = 4220 \cdot 5 = 21100 \text{ (J)}$$

L'énergie totale rayonnée (chauffage et refroidissement) est : $W_{\text{ray}} = 137.0759 \text{ J}$

L'énergie totale par convection (chauffage et refroidissement) est : $W_{\text{conv}} = 7571.223 \text{ J}$

La quantité d'énergie perdue par rayonnement et par convection est :

$$W_{\text{perdue}} = W_{\text{ray}} + W_{\text{conv}} = 1708.2989 \text{ J}$$

L'énergie totale fournie pour la conduction et le changement d phase est :

$$W_{\text{laser}} - W_{\text{perdue}} = 19391.7011 \text{ J}$$

La proportion de l'énergie perdue par rayonnement et par convection par rapport à l'énergie totale est :

$$W_{\text{perdue}} / W_{\text{laser}} = 1708.2989 / 21100 = 0.08095 = 8.09\%$$

L'énergie perdue par rayonnement et par convection est estimé à 8.09 %

III-9- Étude de la variation de la température et le rayonnement thermique lors du soudage du magnésium :

III-9-1- L'alliage de Magnésium Mg :

Le tableau III-5 présente les propriétés physiques de magnésium (Mg) utilisées dans nos calculs de soudage.

Tableau III-5 : Les propriétés physiques [1] de Mg utilisées dans les calculs :

Grandeurs physiques	unité	Symbole / Valeur
Température du Fusion	(K)	$T_s = 923$
Température du Vaporization	(K)	$T_L = 1364$
Densité (solide)	(kg/m ³)	$\rho_s = 1762.5$
Densité (liquide)	(kg/m ³)	$\rho_l = 1735$
La capacité calorifique (solide)	(J/(kg· K))	$C_{ps} = 5.485$

La capacité calorifique (liquide)	(J/(kg· K))	$C_{pl}=6.216$
La conductivité thermique (solide)	(W/(m· K))	$k_s=0.293$
La conductivité thermique (liquide)	(W/(m· K))	$k_l=0.402$
Enthalpie de fusion[23]	H	8.95

III-9-2- Les conditions de soudure

Les dimensions de la surface étudiée sont pour chaque plaque : 600 mm x 40 mm. Pour les paramètres de soudage, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

- ❖ Longueur d'onde $10.6 \mu\text{ m}$.
- ❖ Puissance du laser : 20W.
- ❖ Diamètre du laser : 0,4 mm
- ❖

III-9-3- Les températures des plaques et l'énergie perdue par convection et par rayonnement

La figure III.32 présente la variation de la température en fonction du temps en présence de la perte de chaleur par rayonnement et convection. Les courbes sont similaires aux courbes relatives à la soudure du titane (figure III.1), où il y a une phase de soudage et une phase de refroidissement.

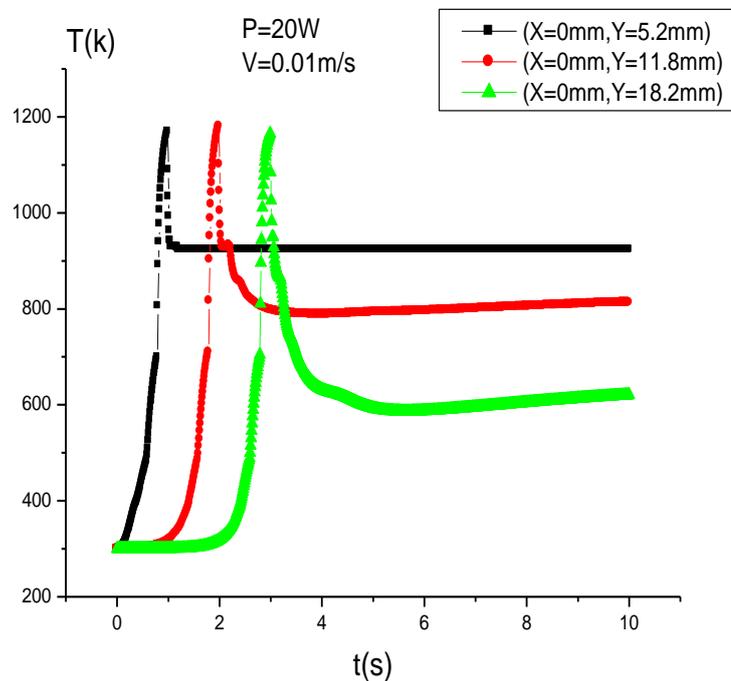


Figure III.32 : Variation de la température en fonction du temps en présence de la perte de chaleur par rayonnement et convection

La figure III.33 présente la variation de la quantité d'énergie perdue par convection et par rayonnement en fonction temps au niveau du cordon de soudure. La perte d'énergie par

rayonnement est plus grande que celle par convection. Le rapport est de 13.08 à la fin de la phase de refroidissement.

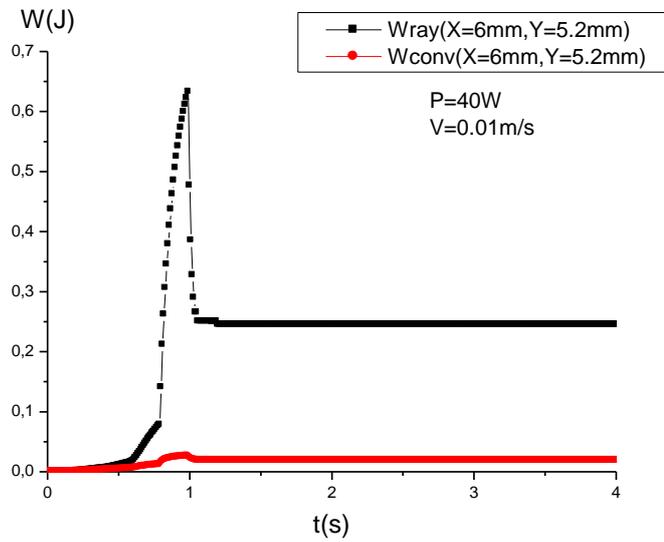


Figure III 33 : Variation de la quantité d'énergie perdu en fonction temps

La figure III.34 présente la variation de la densité d'énergie spectrale en fonction de la longueur d'onde au niveau du cordon de soudure à l'instant $t=4s$ (fin de la phase de soudure)..

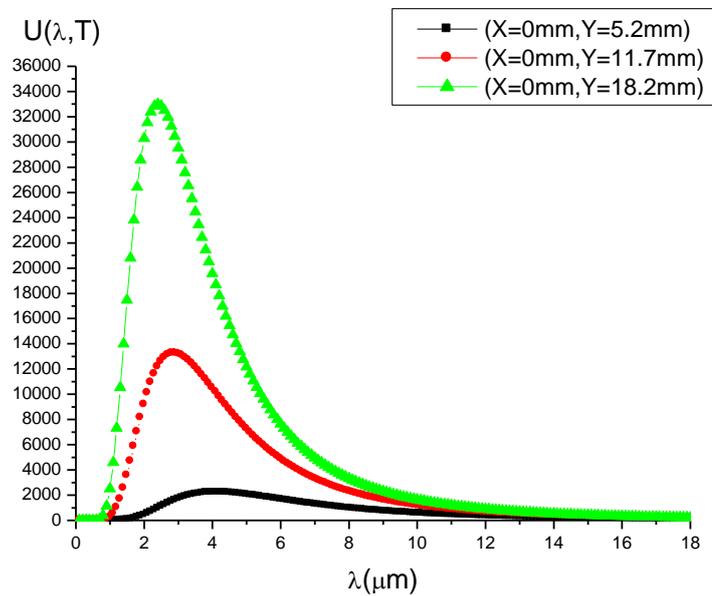


Figure III 34 : Densité d'énergie spectrale à l'instant $t=4s$.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Dans ce mémoire nous avons étudié l'opération de soudure par laser CO₂ en mode continu sur une surface symétrique par rapport l'axe X, et composée de deux pièces de même alliage. Les alliages utilisés sont l'alliage de titane (TA6V) et l'alliage de magnésium. Pour l'alliage de titane, les conditions expérimentales de soudure sont de l'ordre de 4000W pour la puissance du laser et 0.008m/s pour la vitesse du laser. Les dimensions des plaques rectangulaires sont 40mmx600mm.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage par laser. Nous avons présenté les différents modes de transferts de chaleur, les lois du rayonnement thermique et l'équation de conservation de l'énergie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation numérique pour le calcul de la température au niveau de la surface des matériaux à souder. Le spot laser est en mouvement avec une vitesse donnée. Le traitement de la phase de fusion a été traité pendant le chauffage du matériau. Nous avons utilisé la méthode des différences finies et la méthode itérative de Gauss-Seidel pour la résolution numérique des équations différentielles. Le but est d'estimer la température à la surface et les pertes d'énergie par rayonnement et par convection en utilisant l'équation de la diffusion de la chaleur suivant les positions et le temps.

Le troisième chapitre est destiné à l'analyse des résultats de la modélisation. Après le calcul des températures en fonction des positions et du temps, nous nous sommes intéressés au calcul des du rayonnement thermique, la convection, les longueurs d'ondes maximales du rayonnement thermique et la densité spectrale du rayonnement thermique.

Nous avons fait une étude paramétrique présentant l'effet de quelques grandeurs et paramètres ; les conclusions se résument à :

- La distribution de la température dépend de la puissance et la vitesse du laser ;
- Les temps de chauffage et de refroidissement sont calculés dans différents points de la plaque. Ces calculs sont d'intérêts pour l'étude des structures du matériaux ;
- La convection et rayonnement présente une perte de 08% du bilan énergétique.

Aux limites des températures de fusion, la soudure des plaques de magésium présente clairement un palier de changement d'état où le flux de chaleur s'accumule et la température reste constante.

Pour les perspectives, nous proposons l'étude des propositions suivantes :

- Soudure de métaux différents ;
- Modélisation à trois dimensions ;
- Propriétés physiques des matériaux dépendantes de la température.

Références

- [1] A. Belhadj ; “ Contribution à l’étude expérimentale et numérique du soudage laser : Application aux alliages de magnésium ”; Doctorat de l’Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tunis (2009).
- [2] I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque; “ Cours de rayonnement” ; (2010-2011).
- [3] M . Bahrami ; “Radiation Heat Transfer ”; Chapter 12, E&CE 309, Spring (2005).
- [4] A. Belhadj, J. Bessrou, J.Masse, M. Bouhafis and L. Barrallier ; “ Finite element simulation of magnesium alloys laser beam welding” ; Journal of Materials Processing Technology. Vol. **210** (2010) 1131–1137.
- [5] R. Rai, J.W. Elmer, T. A. Palmer and T. DebRoy ; “ Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti–6Al–4V, 304L stainless steel and vanadium”; Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. **40** (2007) 5753–5766
- [6] F. Doumenc ; “ Eléments de thermodynamique et thermique ” ; Mémoire Université Pierre et Marie Curie, (2009/2010).
- [7] G. Emilie ; “Etude 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” ; Thèse de doctorat ; Université de Bretagne Sud ; (2010).
- [8] M. Bahrami ; “Radiation Heat Transfer ”; Chapter 12, E&CE 309, Spring (2005).
- [9] F. Doumenc ; “ Eléments de thermodynamique et thermique ” ; Université Pierre et Marie Curie,(2009/2010).
- [10] M. Akbari, S. Saedodin, D. Toghraie, R. Shoja-Razavi and F. Kowsari ; “ Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy”; Journal homepage. Vol. **59** (2014) 52–59.
- [11] R. Rai, J.W. Elmer, T. A. Palmer and T. DebRoy ; “ Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti–6Al–4V, 304L stainless steel and vanadium”; Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. **40** (2007) 5753–5766

Références

- [12] C. Nicodeau ; “Modélisation du soudage en continu de composites a matrice thermoplastique” ; Thèse de doctorat ; Ecole Nationale Supérieure D’Arts et Métiers Centre de Paris, (2005).
- [13] G. Tirand ; Etude des conditions de soudage laser d’alliages base aluminium par voie expérimentale et a l’aide d’une simulation Numérique” ; Thèse de doctorat ; Ecole Doctorale Des Sciences Physiques pour l’Ingénieur, (2012).
- [14] M. Massaud; “Etude du perçage et du soudage laser : dynamique du capillaire ”; Thèse de doctorat ; Université De Bourgogne, (2011).
- [15] J. Zhou, H. Tsai and P. Wang ; “Transport phenomena and keyhole dynamics during pulsed laser welding ”; Vol. **128**, (2006) 131.151.114.242.
- [16] G. Roméo and Y. Njankeu Sabeya ; “Comportement tribologique d’un alliage de titane traité et / ou revêtu en fretting à débattement libre” ; Thèse de doctorat ; Ecole Doctorale : Matériaux – Structure – Mécanique, Institut National Polytechnique De Toulouse (2007).
- [17] F. Khelfaoui ; Cours de Master ; Université Kasdi Merbah Ouargla (2014).
- [18] G. Emilie ; “Etude 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” ; Thèse de doctorat ; Université de Bretagne sud, (2010).
- [19] S. Guerrida ; “Etude de la soudure au laser en industrie’ ; Mémoire de master ”; Université Kasdi Merbah Ouargla ; 2012
- [20] S. Guerrida, S. Lemkeddem et F. Khelfaoui ; “Modélisation du comportement thermique du soudage laser CO₂ aux limites des températures de fusion” ; SIPP’2013, Ouargla, 11-14 Mars (2013).
- [21] K. Telib ; “Etude de la soudure au laser aux limites des températures de fusion des métaux” ; Mémoire de Master ; Université Kasdi Merbah Ouargla ; (2013).
- [22] G. Roméo ; “ *Comportement tribologique d’un alliage de titane traite et/ou revetu en fretting à débattement libre*”; Thèse de Doctorat, Université de Toulouse (2007).
- [23] [EnvironmentalChemistry.com](http://environmentalchemistry.com)
<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Mg.html>
consulté le 04/06/2014.

Résumé:

L'étude numérique des procédés de soudage est un domaine de recherche qui fait l'objet de plusieurs travaux. C'est un moyen très efficace pour maîtriser les principaux effets du soudage et pour s'assurer de la fiabilité des soudures. Dans notre travail nous avons utilisé un laser CO₂ pour le soudage de deux plaques identiques d'alliage de titan (TA6V). Nous proposons un modèle numérique sous le langage FORTRAN pour déterminer la distribution de la température à la surface en fonction du temps et les pertes d'énergie par rayonnement et par convection. Pour cela, nous avons utilisé les équations de conservation de l'énergie et le débit de la chaleur avec la considération des pertes. Pour la résolution numérique nous avons utilisé la méthode des différences finies et l'algorithme itératif de Gauss-Seidel. Les résultats obtenus sont en accord acceptable avec des résultats publiés auparavant. Nous avons utilisé ces résultats afin de trouver le rayonnement thermique lors de soudage et le comparer avec les pertes par convection et avec l'apport d'énergie du laser.

Mots-clés:

Soudure, Laser, Températures, Rayonnement thermique, Convection à l'air, Plaque métallique

دراسة الاشعاع الحراري أثناء التلحيم بالليزر لصفيحتين معدنيتين

ملخص:

تعتبر الدراسة العددية لعمليات التلحيم بالليزر مجالاً هاماً للبحث العلمي و هو موضوع للعديد من الأعمال. و هي وسيلة فعالة جداً من أجل التحكم (TA6V لصفيحتين متماثلتين من سبائك التيتانيوم (CO₂ استخدمنا اللحام بالليزر هذه دراستنا في آثار التلحيم و ضمان فاعليته. في على سطح الصفيحة مع الأخذ بعين الاعتبار فقدان الطاقة عن بدلالة الزمن اقترحنا نموذج عددي بلغة الفورتران لتحديد توزيع درجات الحرارة الحرارة مع اعتبار الضياع في الطاقة. و للحل العددي استخدمنا طريقة طريق الإشعاع والحمل. لأجل ذلك استخدمنا معادلات إنحفاظ الطاقة وتدفق الفروق المنتهية وحوارزمية غوص صيدل التكرارية. النتائج المتحصل عليها هي في تطابق مقبول مع نتائج نشرت في السابق. و اقد استخدمنا هذه النتائج للحصول على مقدار الاشعاع الحراري أثناء التلحيم و مقارنته مع الضياع بالحمل الحراري و مع طاقة الليزر الواردة.

: المفتاحية الكلمات

صفيحة معدنية، الإشعاع الحراري، الحمل الحراري، الحرارة، الليزر، درجات، التلحيم

Study of thermal radiation during the laser welding of metal plates

Summary:

The numerical study of welding processes is the subject of several works. This is a very effective means to control the principal effects of welding and to make sure of the reliability of the welding. In our work we used a CO₂ laser welding of two identical plates alloy titan (TA6V). We propose a numerical model in the FORTRAN language to determine the temperature distribution on the surface as a function of time and energy **loss** by radiation and convection. For this, we used the equations of conservation of energy and heat flow with the account of **losse**. For numerical resolution we have used the finite difference method and the algorithm of Gauss-Seidel. The results are in acceptable agreement with previously published results. We use these results to find the thermal radiation during welding and compare with convection **losses** and with the energy input of the laser.

Keywords:

Welding, Laser, temperature, thermal radiation, convection air, metal plate.