

x N<sup>o</sup> d'ordre :  
N<sup>o</sup> de série :

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**ET DES SCIENCES DE LA MATIERE**  
**Département des Sciences de la Matière**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Rayonnement et Spectroscopie et Optoélectronique

Présenté par : **TELIB Kenza**

**Thème**

**Etude de la soudure au Laser aux limites  
des températures de fusion des métaux**

Soutenu publiquement

Le : 24/06/2013

Devant le jury composé de :

Dr. GHERIANI Rachid	MCA	président	UKM OUARGLA
Melle BALLAH Zakia	MAA	Examineur	UKM OUARGLA
Pr. KHELFAOUI Fethi	Prof	Rapporteur	UKM OUARGLA
Mme LEMKEDDEM Soumaya	MAA	Co-encadreur	UKM OUARGLA

Année Universitaire : 2012/2013

Dédicace

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

*À tous les membres de la famille FELIB*

*À tous mes amis.*

*À toute personne qui m'a aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.*

**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 ces 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 Dr GHERIANI Rachid et l'examineur Melle BALLAH Zakia 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 Sciences de la Matière.*

*Merci à tous les collègues et à tout le personnel du laboratoire pour leur encouragement : Abir, Salima, Wafa et Rafia.*

*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 .....	vii
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>

### Chapitre I : le laser et le soudage au laser

I.1 Le soudage par faisceau laser.....	3
I.1.1 Le rayonnement laser.....	3
I.1.2 Principe de fonctionnement du LASER.....	4
I.1.2.1 Interaction rayonnement-matière.....	4
I.2 Introduction au soudage laser.....	5
I.2.1 Le soudage par faisceau laser.....	5
I.2.1.1 Le soudage laser.....	5
I.2.1.2 Principe du soudage laser.....	5
I.2.1.3 Paramètres du soudage par laser.....	6
I.3 Différents types du soudage par faisceau laser.....	7
I.4 Équipements.....	8
I.5 Le titane et ses alliages.....	8
I.5.1 Classification des alliages de titane et effets des éléments d'alliage.....	10
I.5.2 Présentation de l'alliage de titane étudié : le TA6V.....	10
I.5.3 Cinétiques de transformation de phases : Diagrammes T.T.T et T.R.C du TA6V.....	11
I.6 Le soudage laser dans l'industrie pétrolière.....	13
I.7 Equations de conservation.....	14
I.7.1 Conservation de la masse (principe de continuité).....	14
I.7.2 Conservation de la quantité de mouvement.....	14
I.7.2 Conservation de l'énergie (Equation de l'énergie).....	14
I.7.3 Equation de flux.....	14

### Chapitre II : Modélisation numérique de l'équation chaleur

II.1 Définition du Phénomène Physique.....	15
II.2 Modèle Mathématique.....	16
II.3 Modélisation numérique.....	17
II.3.1 Méthode des différences finies.....	17
II.3.2 Application de la Méthode des différences finies aux points du maillage	18
II.4 Conditions initiales et conditions aux limites.....	19
II.5 Forme matricielle des équations différentielles.....	20
II.6 Organigramme de calcul de température.....	21

### **Chapitre III : Résultats et discussion**

III.1 Condition de l'opération.....	23
III.2 Vérification des équations et du programme.....	24
III.3 Variation de la température en fonction de temps pour un laser mobile.....	26
III.4 Profils de température.....	28
III.4.1 Profils de température suivant l'axe X .....	28
III.4.2 Profils de température suivant l'axe Y.....	30
III.4.3 L'impact de la vitesse du laser sur la température suivant le temps pour une puissance $p=1000W$ .....	31
III.4.4 L'impact de la puissance sur la température suivant le temps pour différents valeurs de la vitesse.....	34
III.4.5 L'impact de la vitesse du laser sur la température suivant le temps pour différents valeurs de la puissance.....	36
III.4.6 Calcul de la vitesse de chauffage et de refroidissement.....	39
III.4.7 Variation de température maximale suivant la puissance et la vitesse.....	40
III.5 Variation de température en fonction du temps pour un laser immobile.....	42
III.5.1 Profils de température en fonction de X et Y.....	43
III.5.1.1 Profils de température suivant l'axe X.....	43
III.5.1.2 Profils de température suivant l'axe Y.....	46
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>49</b>
<b>Référence bibliographiques.....</b>	<b>50</b>
<b>Résumé</b>	

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un laser..... (3)

Figure I.2 : Illustration des processus pour le fonctionnement du laser..... (4)

Figure I.3 : Procédé de soudage par laser.....(6)

Figure I.4 : Paramètres du soudage par faisceau laser..... (6)

Figure I.5 : Le laser CO<sub>2</sub> SLAB..... (8)

Figure I.6 : Structure cristallographique du titane non allié..... (9)

Figure I.7 : Transformation allotropique  $\beta$  (cc)  $\rightarrow$   $\alpha$  (hc) ..... (9)

Figure I.8 : Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V.....(10)

Figure I.9 : Diagramme TTT après remise en solution à 1025°C, 30 min..... (12)

Figure I.10 : Diagramme TRC du TA6V..... (13)

Figure II.1 : Quelques Phénomènes physiques au cours du soudage laser..... (15)

Figure II.2 : schéma les nœuds de maillage.....(17)

Figure II.3 : Organigramme de calcul de température.....(21)

Figure (III.1 à III.3) : Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon..... (24)

Figure III.4 : Températures calculées en fonction du temps. (a) Localisation de détermination de la température (b) Températures calculées.....(26)

Figure (III.5 à III.7) : Profil de la température en fonction du temps pour différent positions X et Y.....(27)

Figure (III.8 à III.10) : Profil de la température suivant l'axe X pour des différentes positions de Y.....(28)

Figure (III.11 à III.13) : Profil de la température suivant l'axe Y pour des différentes positions de X.....(30)

Figure III.14 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions (v=0.1mm/s).....(32)

Figure III.15 : Profil de la température en fonction du temps pour différent positions (v=0.25mm/s).....(32)

Figure III.16 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions (v=0.5mm/s).....(33)

Figure III.17 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions (v=0.7 mm/s).....(33)

Figure (III. 18, III.19) : Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeur de puissance...(34)

Figure (III.20 à III.22) : Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeurs de vitesse..... (36)

Figure III.23 : Températures calculées en fonction du temps en un point de la ligne de soudure pour trois conditions de soudage :(a) régime transitoire et (b) régime Permanent.....(38)

Figure III.24 : Profil de la température en fonction du temps pour différent positions Y.....(39)

Figure III.25 : Variation de la température maximale en fonction de la puissance pour différentes valeurs de vitesse.....(40)

Figure III.26 : Profil de la température maximale suivant la vitesse pour différentes valeurs de puissance.....(41)

Figure III. 27: Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon.....(42)

Figure III. 28: Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe X et différentes valeurs de puissance..... (42)

Figure III.29: Profil de la température suivant l'axe X à l'instant  $t=0.06s$ .....(43)

Figure III.30: Profil de la température suivant l'axe X dans à l'instant  $t=0.06s$ .....(44)

Figure III.31: Profil de la température suivant l'axe X à l'instant  $t=0.06s$ .....(44)

Figure III.32 : Profil de la température suivant l'axe X pour différentes valeurs de puissance sur  $y=0$ .....(45)

Figure III.33: Profil de la température suivant l'axe X pour différentes valeurs de puissance sur  $y=0.5$  mm.....(45)

Figure (III.34 à III.38) : Profil de la température suivant l'axe Y dans des positions différentes de X.....(46)

**Liste des tableaux**

Tableau III.1 : Les propriétés physiques de TA6V utilisées dans les calculs..... (23)

Tableau III.2 : La variation de température maximale dans la position  $x=0$  et  $y=1.8\text{mm}$   
suivant à la puissance pour différent valeur de vitesse..... (40)

Tableau III.3 : La variation de température maximale pour la position  $x=0$  et  $y=1.8\text{mm}$   
suivant la vitesse pour différentes valeurs de puissance.....(41)

# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

La technologie des lasers de puissance s'est imposée dans le milieu industriel, il y a presque une cinquantaine d'années. Les premières applications par laser ont commencé dans les domaines de la transformation métallurgique comme l'automobile, l'aéronautique, la sidérurgie. Aujourd'hui, les lasers de puissance sont omniprésents dans toutes les industries de mise en forme comme le brasage, le durcissement, le frittage laser mais aussi dans le secteur des produits de consommation courante, le biomédical. Il s'implante également comme un outil innovant dans des domaines technologiques de pointe comme le marquage des verres, dans la mécanique de précision, l'électronique etc.... Cette diversité d'applications revient aux propriétés exceptionnelles de la lumière laser. Ces propriétés permettent une bonne focalisation et des densités de puissance dans une gamme relativement étendue allant de quelques  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  à quelques  $\text{GW}/\text{cm}^2$  [1]

L'assemblage entre deux pièces de métal identiques ou différentes peut être fait par une énergie très haute estimée à ( $10^{10} \text{ W}/\text{m}^2$  à  $10^{13} \text{ W}/\text{m}^2$ ) [2]. Cette opération se passe manuellement ou automatiquement et elle est caractérisée par son exactitude et sa grande vitesse.

Le but de notre travail est l'étude et la modélisation de la distribution de la température sur une plaque soudée par faisceau laser aux limites de la température de fusion. Nous avons essayé de réaliser les objectifs suivants :

1. Etude bibliographique sur les lasers et la soudure.
2. Etudes des procédés de soudure aux lasers en sidérurgie.
3. Etude de l'utilisation des lasers en industrie et l'industrie pétrolière.
4. Choix d'un laser et d'un procédé de soudure.
5. L'étude et la modélisation de la distribution de la chaleur sur une plaque soudée par faisceau laser dans le cas de laser fixe ou mobile.

Le premier chapitre est une présentation des notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage et en particulier le soudage par laser. Une importance particulière est donnée aux diagrammes de changement de phases suivant les températures. Les structures des matériaux dépendent énormément de la composition des matériaux et des modes de chauffage et de refroidissement. On présente les équations de conservation nécessaires pour l'étude des fluides en particulier l'équation de l'énergie (ou de la chaleur).

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. Le traitement de la phase de fusion a été traité pendant le chauffage du matériau. Le spot laser est en mouvement avec une vitesse donnée. Nous avons choisi la méthode des différences finies et la méthode itérative de Gauss-Seidel pour la résolution numérique des équations différentielles.

Le troisième chapitre est destiné à l'analyse des résultats de la modélisation. Un intérêt particulier est fait pour l'étude du début de la soudure et le traitement de la phase de fusion pendant le chauffage du matériau. Des comparaisons sont faites avec des résultats expérimentaux [3].

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

# CHAPITRE I

## Chapitre I :

### Le laser et le soudage au laser

#### I.1 Le soudage par faisceau laser

##### I.1.1 Le rayonnement laser

En 1916, Albert Einstein définit les lois d'émission de photons (lumière) par stimulation (pompage optique) et émet le principe de l'émission stimulée qui ouvre la porte à une nouvelle technologie : le LASER « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » soit en français l'amplification de lumière par émission stimulée de radiations.

Le faisceau laser est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde. Il est généré dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement transparent et contenant un milieu actif généralement solide ou gazeux. Le milieu actif est excité par une source d'énergie qui induit dans la cavité une émission stimulée (figure I.1). Les lois de l'émission stimulée font que les photons réémis ont tous la même fréquence et la même phase. À partir d'un certain seuil, il y a amplification et émission d'un très grand nombre de photons qui constituent une onde électromagnétique cohérente. La fréquence de celle-ci est celle des photons qui la génèrent et elle est fixée par la nature du milieu excité [4].

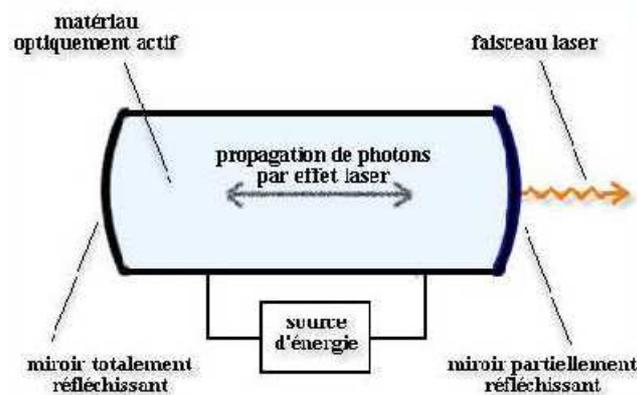


Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un laser [4].

## 1.1.2 Principe de fonctionnement du LASER

### 1.1.2.1 Interaction rayonnement-matière

On considère un atome soumis à un rayonnement électromagnétique. Les niveaux d'énergie accessibles aux électrons de cet atome sont notés  $E_1, E_2, E_3 \dots$  ;  $E_1$  correspondant au niveau fondamental [5].

Le rayonnement électromagnétique a une fréquence  $\nu$  telle que  $h\nu = E_2 - E_1$ .

Les photons de ce rayonnement peuvent alors interagir avec l'atome suivant 3 processus:

#### a) L'absorption

Le photon d'énergie  $E = E_2 - E_1$  peut être absorbé et permet la transition d'un électron du niveau  $E_1$  vers le niveau  $E_2$ .

#### b) L'émission spontanée

L'émission correspond à la transition inverse ; l'électron revient très rapidement à son niveau fondamental avec émission d'un photon de même énergie que le photon absorbe. Cette émission spontanée se fait dans des directions quelconques ; elle est dite isotrope.

#### c) émission stimulée

En 1917, EINSTEIN décrit le principe de l'émission stimulée. On considère que l'atome est excité et possède déjà un électron au niveau d'énergie  $E_2$  Sous l'action du rayonnement électromagnétique d'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$ , la transition de l'électron vers le niveau 1 est alors déclenchée (stimulée) avec émission d'un photon (Figure I.2).

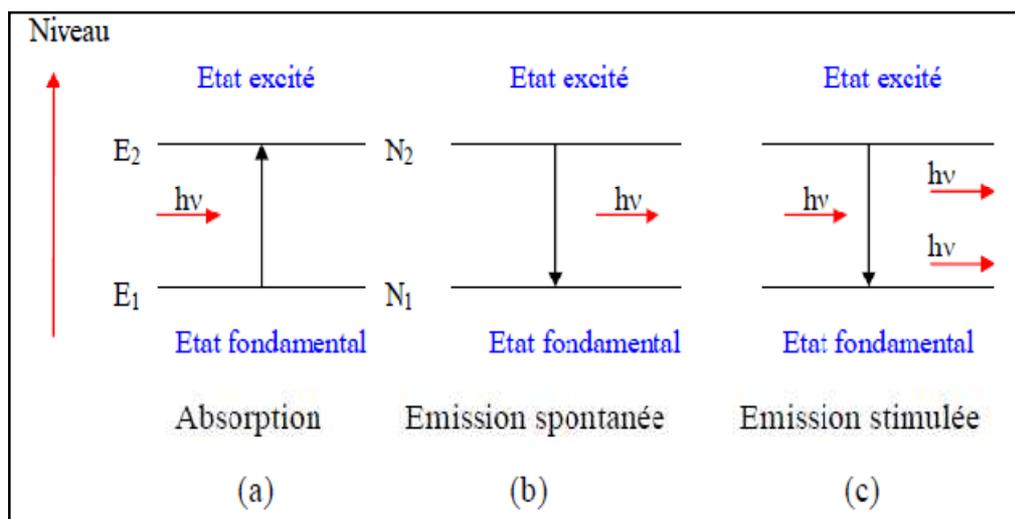


Figure I.2 : Illustration des processus pour le fonctionnement du laser.

## I.2 Introduction au soudage laser

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes de la mise en œuvre sont très différents. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre.

Le soudage laser est utilisé dans l'industrie automobile depuis de nombreuses années. En 1975, Fiat installait un laser CO<sub>2</sub> pour le soudage de composantes de transmissions.

Au cours des années 1980, les constructeurs ont commencé à remplacer le soudage par résistance par le soudage au laser pour joindre des feuilles de différentes épaisseurs et compositions.

Malgré le peu de connaissance qu'une large part de l'industrie manufacturière, le soudage laser est un procédé mature ayant fait ses preuves [6].

### I.2.1 Le soudage par faisceau laser

#### I.2.1.1 Le soudage 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  $10^5 \text{ W/cm}^2$ . Le soudage en trou de serrure, quand à lui, implique la vaporisation du métal sous l'action d'une énergie d'au moins  $10^6 \text{ W/cm}^2$  [6].

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.2.1.2 Principe du soudage 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.3), produisant de fortes densités de puissances de l'ordre de  $10^5$  W/cm<sup>2</sup> à  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> [4],

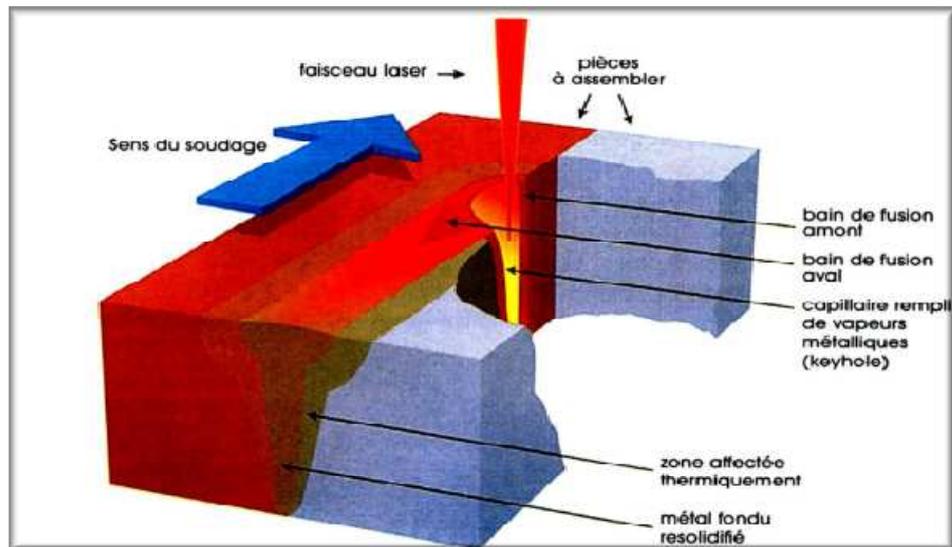


Figure I.3 : Procédé de soudage par laser [4].

### I.2.1.3 Paramètres du soudage par laser

Le soudage par faisceau laser dépend de plusieurs paramètres qui sont liés au faisceau laser [7] :

- la puissance du rayonnement laser ;
- son profil de puissance ;
- la distance focale et la position du point focal par rapport au joint ;
- la vitesse de déplacement et éventuellement la vibration du rayon.

La figure (I.4) récapitule les différents paramètres mis en jeu dans un procédé d'assemblage par faisceau laser.

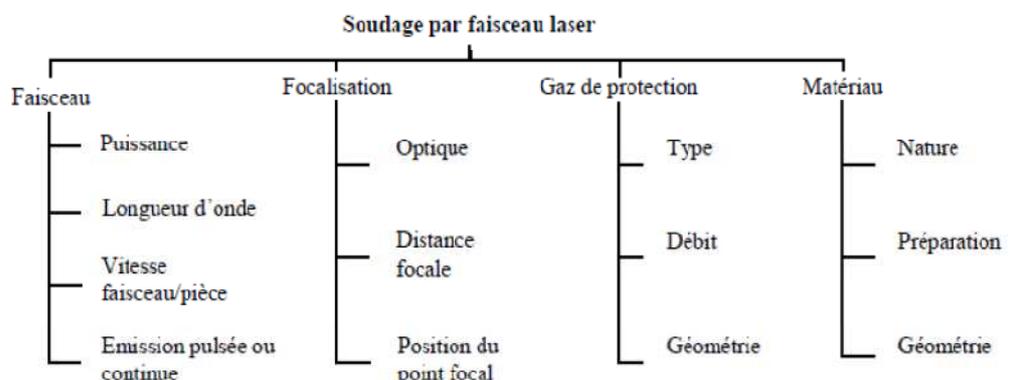


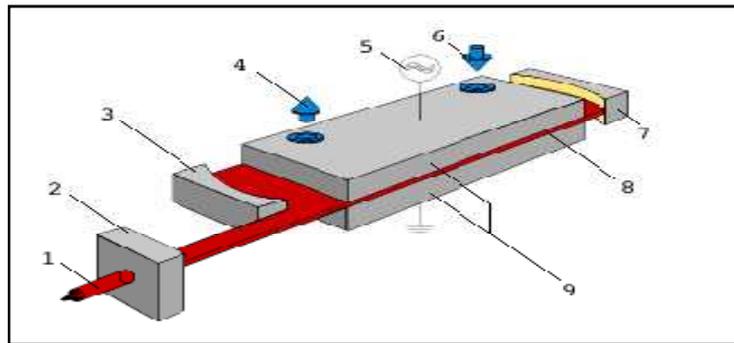
Figure I.4 : paramètres du soudage par faisceau laser [4].

### *1.3 Différents types du soudage par faisceau laser*

Les lasers sont classés en cinq grandes familles, selon la nature du milieu excité : laser à solide, laser à gaz, laser à semi-conducteurs, laser à liquide et laser à électrons libres. Les lasers utilisés industriellement pour le traitement des matériaux et principalement pour le soudage des métaux sont les lasers Nd-YAG et les lasers CO<sub>2</sub>.

Les lasers Nd-YAG sont des lasers solides dont le milieu actif, de nature cristalline, est un grenat d'aluminium-yttrium (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) dopé à 1020 ions trivalents néodyme (Nd<sup>3+</sup>) émettant une onde de longueur d'onde 1,06 mm. Les lasers solides Nd-YAG peuvent fonctionner de façon pulsée permettant de donner une puissance moyenne de 500 W ou continue, permettant d'augmenter l'interaction avec la matière. Ils sont par excellence l'outil de micro soudage de précision, mais que l'on tente d'exploiter de plus en plus en soudage de tôles automobiles ou aéronautiques. Les lasers Nd-YAG présentent l'avantage de pouvoir être transportés par fibres optiques sur plusieurs dizaines de mètres grâce à leur faible longueur d'onde.

Les Lasers CO<sub>2</sub> sont des lasers à gaz dits moléculaires, car ils mettent en œuvre les niveaux de vibration-rotation de molécules de CO<sub>2</sub> dans un mélange d'azote et d'hélium à basse pression (0,1 bar). Les molécules d'azote sont excitées par une décharge électrique et, par collisions inélastiques, transfèrent l'énergie acquise aux molécules de CO<sub>2</sub> qui sont l'objet de l'émission stimulée. Les lasers CO<sub>2</sub> produisent un faisceau de 10,6 μm de longueur d'onde, très finement focalisable. Grâce à leur puissance de 0,1 à 45 kW, leurs possibilités en soudage sont supérieures à celles des lasers Nd-YAG. À cette longueur d'onde, les faisceaux laser CO<sub>2</sub> ne pouvant être transportés par fibres, cela implique l'utilisation des miroirs métalliques, traités et refroidis, pour dévier le faisceau. Suivant la technique de refroidissement, il existe différentes technologies de laser à CO<sub>2</sub>. Ces techniques dépendent de l'utilisation recherchée et de la puissance maximale pouvant être extraite de la cavité. Les lasers CO<sub>2</sub> utilisés dans le soudage sont les lasers CO<sub>2</sub> à flux axial rapide, les lasers CO<sub>2</sub> à flux transverse et les lasers CO<sub>2</sub> SLAB, (figure I.5).



**Figure I.5 :** Le laser CO<sub>2</sub> SLAB [4].

1. Faisceau laser
2. Télescope
3. Miroir avant
4. Eau de refroidissement
5. Excitation RF
6. Eau de refroidissement
7. Miroir arrière
8. Décharge
9. Electrode

#### **I.4 Équipements**

À l'heure actuelle, plusieurs types de sources laser sont proposés par les fournisseurs. Les sources à diodes, CO<sub>2</sub> et Nd:YAG à barreau sont disponibles depuis de nombreuses années et elles ont fait leurs preuves dans différentes industries. Plus récemment, les sources à fibre et Yb:YAG à disques ont également conquis de belles parts de marché grâce à leur haute efficacité et aux nombreux avantages que procure leur faisceau de grande qualité optique.

Chaque technologie ayant ses propres forces et faiblesses et étant adaptée à des applications particulières, on ne peut déclarer l'une d'elles absolument supérieure aux autres. Le choix d'une source laser s'effectue donc en fonction des applications visées et des priorités de l'entreprise [6].

#### **I.5 Le titane et ses alliages**

À température ambiante et pression atmosphérique, la structure cristalline du titane pur est hexagonale compacte (HCP  $\alpha$ ) avec un rapport  $c/a$  de 1,587. A 882°C, température de transus, le métal subit une transformation allotropique de la structure HCP vers la structure cubique centrée (CC  $\beta$ ). La phase  $\beta$  est stable jusqu'à la température de fusion égale à

1670°C. La température à laquelle a lieu la transformation allotropique est appelée « transus  $\beta$  » [8], (Figure I.6).

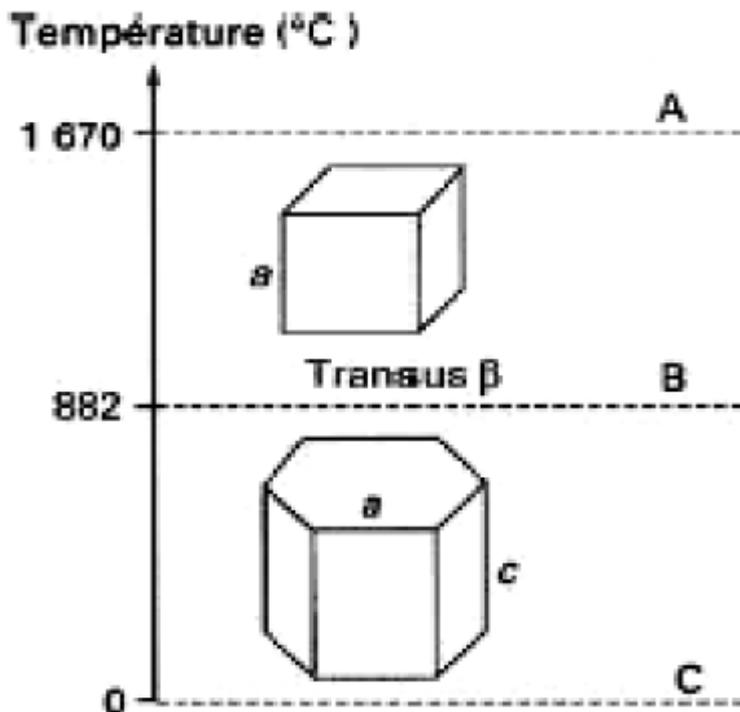


Figure I.6 : Structure cristallographique du titane non allié [2]

- A: Etat liquide,
- B: Phase  $\beta$  cubique centrée ( $a=0,332$  nm),
- C: Phase  $\alpha$  hexagonale pseudo-compacte ( $a=0,295$ nm,  $c=0,4682$ nm,  $c/a=1,587$ ).

La transformation allotropique  $\beta \leftrightarrow \alpha$  du titane présente des caractères spécifiques de la transformation martensitique, selon le mécanisme proposé par Burgers pour le zirconium. La Figure (I.7) montre que l'on peut passer de la forme cubique centrée à la forme hexagonale par un faible déplacement (inférieur à une distance interatomique) de quelques atomes et par un léger réarrangement de ceux-ci [2].

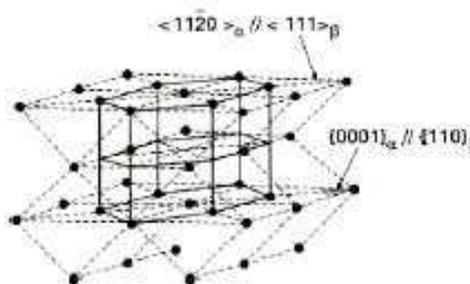


Figure I.7 : Transformation allotropique  $\beta$  (cc)  $\rightarrow$   $\alpha$  (hc)

### I.5.1 Classification des alliages de titane et effets des éléments d'alliage

Les alliages de titane sont classés suivants le type de structure qu'ils favorisent à la température ambiante. On distingue les alliages de types  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\alpha$ - $\beta$ . Ils ont chacun leurs propres spécificités face aux opérations de soudage [2].

- **Les alliages  $\alpha$**  contiennent une forte majorité d'éléments alphasènes, et présentent à température ambiante quasiment 100% de phase  $\alpha$ ,
- **Les alliages  $\beta$  et quasi  $\beta$**  sont constitués principalement de la phase  $\beta$  stable ou métastable,
- **Les alliages  $\alpha$  et  $\beta$**  contiennent à la fois les phases  $\alpha$  et  $\beta$  à température ambiante.

### I.5.2 Présentation de l'alliage de titane étudié : le TA6V

#### \* Généralité

L'alliage considéré dans l'étude est le TA6V4 (ou TA6V), alliage largement étudié dans la littérature. Le bon compromis entre résistance mécanique et ténacité, en plus de sa faible densité et son excellente résistance à la corrosion (jusqu'à 1160 MPa en  $R_m$  pour une densité de 4,42 g/cm<sup>3</sup>), en font l'un des plus utilisés dans divers domaines d'application (industrie chimique, aérospatiale, biomédical ...). Il s'agit de pièces forgées, usinées ou matricées [5].

La composition de l'alliage est de 6% en poids d'aluminium et 4% en poids de vanadium, et des éléments résiduels. Nous avons porté (Figure I.8) un schéma du diagramme de phase.

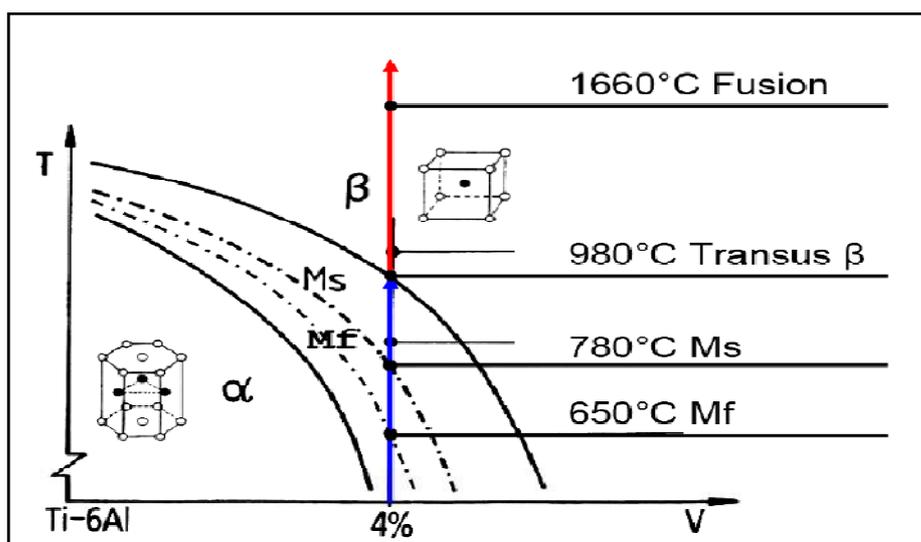


Figure I.8 : Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V [2].

À température ambiante, le TA6V est biphasé  $\alpha$  (HCP) +  $\beta$  (CC) avec un très faible pourcentage de phase  $\beta$ . Au cours du chauffage lent, il y a dissolution de la phase  $\alpha$ , et la fraction de phase  $\beta$  augmente pour être égale à 1 aux températures supérieures à la température de transus  $T_\beta$ . Cette valeur de l'ordre de 980-1000°C, est fonction de la composition de l'alliage et est très sensible aux teneurs en éléments résiduels, notamment l'oxygène. Au delà de la température  $T_\beta$ , seule la phase  $\beta$  est présente. Elle est de structure cubique centrée de paramètre  $a = 3,192 \text{ \AA}$  (ce paramètre est inférieur à celui du titane pur du fait de la contraction induite par le vanadium dont le paramètre de maille est plus petit que celui du titane). La température de fusion du TA6V se situe vers 1660°C et sa température d'ébullition est autour de 3285°C.

### **I.5.3 Cinétiques de transformation de phases : Diagrammes T.T.T et T.R.C du TA6V**

Pour atteindre les cinétiques de transformations de phases, il est usuel d'établir les diagrammes TTT (Transformations-Temps-Température) et TRC (Transformations en Refroidissement Continu). Les premières études de cinétique de transformation ont été celles de [6] et [7] qui introduisent les diagrammes T.T.T. (Transformation-Temps-Température) et TRC (Transformations en Refroidissement Continu) du TA6V [2].

#### **(a) Diagramme T.T.T. du TA6V**

Les diagrammes T.T.T. caractérisent, lors d'un maintien isotherme consécutif à un brusque refroidissement, la nature et les instants de début et de fin de transformations structurales en fonction de la température [2].

La Figure (I.9) représente la cinétique de transformation du TA6V après une remise en solution à 1025°C pendant 30 minutes.

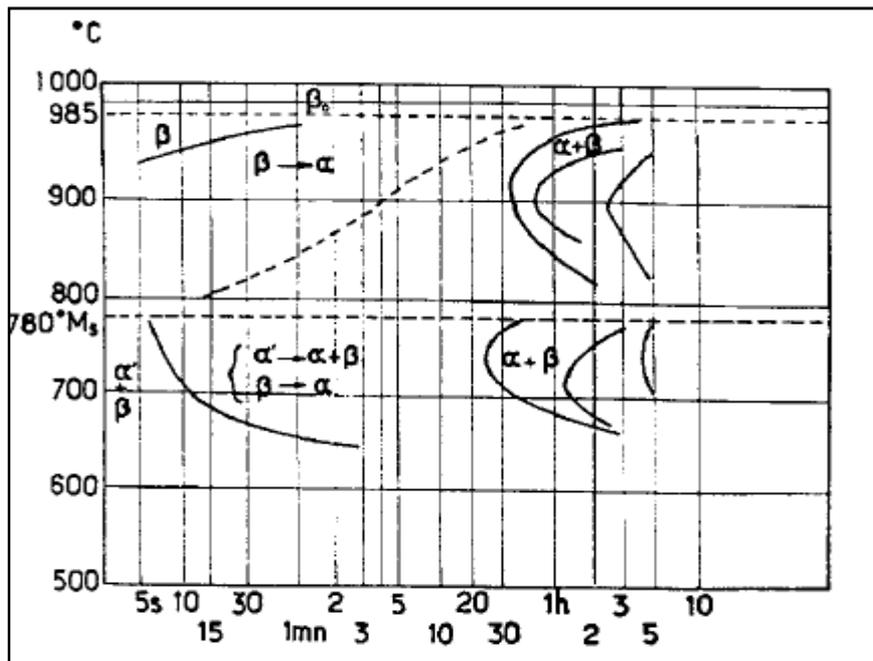


Figure I.9 : Diagramme TTT après remise en solution à 1025°C, 30 min [2].

### (b) Diagramme T.R.C. du TA6V

Les diagrammes T.R.C. caractérisent le comportement métallurgique du TA6V lors d'un refroidissement continu vers la température ambiante. Ils définissent pour un ensemble d'histoires thermiques subies par la pièce au refroidissement, les instants et les températures de début et de fin de transformations structurales relatives à chacune de ses histoires thermiques particulières et dans certain cas les pourcentages de constituants formés lorsqu'une transformation s'achève. La Figure (I.10) représente le diagramme de transformation en refroidissement continu du TA6V après une mise en solution à 1030°C pendant 30 minutes [2].



électrique, et n'ont pas les composants ou optiques sensibles. En conséquence, les coûts d'investissement au cours des cinq dernières années ont encore diminué de moitié environ [9]. En plus des turbines à gaz industrielles et de composants aérospatiaux, le laser revêtement devient plus abordable pour les applications industrielles générales, telles que des outils d'extraction de pétrole et de gaz et les moteurs à pistons, compresseurs, pompes et matériel agricole même.

## I.7 Equations de conservation

### I.7.1 Conservation de la masse (principe de continuité)

L'équation de conservation de la masse d'un fluide incompressible sous la forme suivante [10] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

- Pour ( $\rho = \text{cte}$ ) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \text{div} \vec{V} = 0 \quad (2)$$

Pour ( $\rho \neq \text{cte}$ ) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \text{div} \vec{V} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \rho \quad (3)$$

### I.7.2 Conservation de la quantité de mouvement

Les équations de conservation de quantité de mouvement ou équation de Navier stokes sous la forme suivante [11] :

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

### I.7.3 Conservation de l'énergie (Equation de l'énergie)

L'équation de l'énergie d'un fluide incompressible sous la forme suivante [11]:

$$\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \overline{\text{div}}(\lambda(T) \overline{\text{grad}} T) \quad (5)$$

### I.7.4 Equation de flux [11]

$$d\Phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \cdot \vec{n} \cdot ds \quad (6)$$

Avec :

$C_p$  : Chaleur spécifique moyenne.

$\rho$  : Densité moyenne (kg/m<sup>3</sup>).

$\lambda$  : Conductivité thermique moyenne (W /m/K).

$d\Phi$  : Flux de chaleur.

## CHAPITRE II

## Chapitre II :

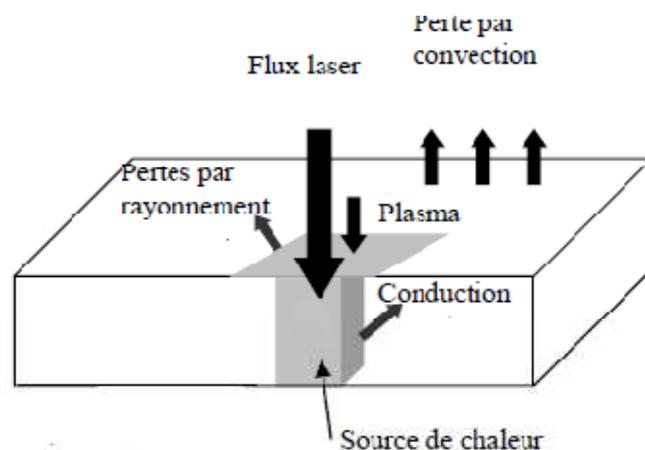
### Modélisation numérique de l'équation chaleur

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation numérique utilisée. Pour le calcul de la température sur une surface à deux dimensions. Nous utilisons la méthode des différences finies. Cette méthode est basée sur la résolution de l'équation différentielle de la diffusion de la chaleur ; nous discrétisons le domaine d'étude en développant en série de Taylor les dérivées partielles [13,14].

#### II.1 Définition du Phénomène Physique

Le soudage fait intervenir de nombreux phénomènes physique, de l'ordre de la thermique (chauffage et refroidissement), de la métallurgie (solidification et transformations des phases du matériau), de la mécanique de fluides (fusion du matériau) et de la mécanique des solides (apparition de contraintes et déformations résiduelles) [15].

Quelques phénomènes physiques pouvant être considérés lors du soudage laser sont illustré dans la figure (II.1).



**Figure II.1 :** Quelques phénomènes physiques au cours du soudage laser [4]

Dans notre travail on a considéré les hypothèses suivantes :

- On néglige les pertes de chaleur par rayonnement et par convection.
- On considère que la vitesse de diffusion de la chaleur est plus grande que vitesse de laser ; c'est-à-dire que le laser est quasi constante.

- On considère que les propriétés physiques (capacité calorifique ou chaleur spécifique, conductivité thermique) sont constantes.
- On considère le problème à deux dimensions.

## II.2 Modèle Mathématique

Pour trouver la distribution de la chaleur sur la surface du matériau il faut tenir en compte de la nature de la phase.

- Dans le domaine occupé par la phase solide (s) on utilise l'équation de la diffusion de la chaleur suivante :

$$\rho_s c p_s \left[ \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \right] = \lambda_s \nabla^2 T(x, y, t) + Q \quad (7)$$

Avec :

$c p_s$  : Chaleur spécifique (20°C).

$\rho_s$  : Densité (kg/m<sup>3</sup>) (20°C).

$\lambda_s$  : Conductivité thermique (W /m/K) (20°C).

- A l'interface solide- liquide on utilise le flux de chaleur :

$$d\Phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \cdot \vec{n} \cdot ds \quad (8)$$

Où:

$d\Phi$  : Flux de chaleur

$\lambda$  : Conductivité thermique

- Dans le domaine occupé par la phase liquide (l) on utilise l'équation de la diffusion de la chaleur suivante :

$$\rho_l c p_l \left[ \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \right] = \lambda_l \nabla^2 T(x, y, t) + Q \quad (9)$$

Avec :

$c p_l$  : Chaleur spécifique (T=Tf).

$\rho_l$  : Densité (kg/m<sup>3</sup>) (T=Tf).

$\lambda_l$  : Conductivité thermique (W /m/K) (T=Tf).

Q : Terme source (W/m<sup>3</sup>).

Tel que

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

## II.3 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 :

$$f(x + hx, y + hy) = f(x, y) + hf'(x, y) + \frac{h^2}{2!} f''(x, y) \dots \dots$$

$$f(x - hx, y - hy) = f(x, y) - hf'(x, y) + \frac{h^2}{2!} f''(x, y) \dots \dots$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{T_{(i+1,j)}^{n+1} - T_{(i,j)}^{n+1}}{hx}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{T_{(i,j+1)}^{n+1} - T_{(i,j)}^{n+1}}{hy}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{n+1} - T_{(i,j)}^n}{ht}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \alpha_1 = \frac{s \lambda}{\rho C p h x^2} \frac{T_{(i-1,j)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i+1,j)}^{n+1}}{h x^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{T_{(i,j-1)}^{n+1} - 2T_{(i,j)}^{n+1} + T_{(i,j+1)}^{n+1}}{h y^2}$$

Pour la discrétisation du problème, nous proposons le maillage suivant :

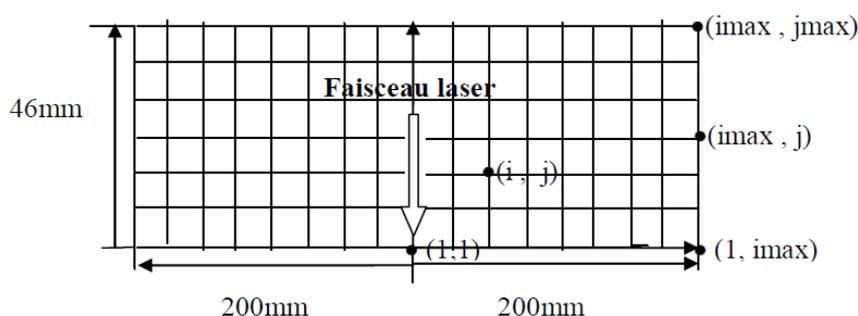


Figure II.2 : schéma des nœuds de maillage

### 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 chaleur, nous obtenons les équations suivantes :

- Pour la phase solide :

$$\rho_s C p_s \left( \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{(i,j)}^n}{ht} \right) = \lambda_s \left( \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(hx)^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{(hy)^2} \right) + Q(i,j) \quad (10)$$

- Pour la transition de phase solide liquide, la température demeure constante et il y a une accumulation de l'énergie afin d'atteindre l'enthalpie de fusion. Le flux de chaleur par pas de temps est :

$$d\Phi_{i,j}^{n+1} = \frac{\lambda_m hy}{hx} (T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}) + \frac{\lambda_m hx}{hy} (T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}) \quad (11)$$

- Pour la phase liquide :

$$\rho_l C p_l \left( \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{(i,j)}^n}{ht} \right) = \lambda_l \left( \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(hx)^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{(hy)^2} \right) + Q(i,j) \quad (12)$$

Ces équations (10), (11) et (12) sont applicables pour les états  $j = 2, j_{\max}-1$  et  $i=2, i_{\max}-1$ .

Par l'application du schéma implicite des différences finies dans les équations 10, 11,12. On obtient les équations suivant :

$$T_{(i,j)}^n + \alpha = -\alpha_1 T_{(i-1,j)}^{n+1} + T_{(i,j)}^{n+1} (2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 1) - \alpha_1 T_{(i+1,j)}^{n+1} \quad (13)$$

$$\alpha = \alpha_2 (T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1})$$

$$d\Phi_{i,j}^n + \beta = \alpha_3 T_{i-1,j}^{n+1} + T_{i,j}^{n+1} 2(-\alpha_3 - \alpha_4) + \alpha_3 T_{i+1,j}^{n+1} \quad (14)$$

$$\beta = \alpha_4 (T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1})$$

$$T_{(i,j)}^n + \theta = -\alpha_5 T_{(i-1,j)}^{n+1} + T_{(i,j)}^{n+1} (2\alpha_5 + 2\alpha_6 + 1) - \alpha_5 T_{(i+1,j)}^{n+1} \quad (15)$$

$$\theta = \alpha_6 (T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1})$$

## II.4 Conditions initiales et conditions aux limites

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

- **1<sup>er</sup> cas :** Pour  $i=1$

$$T_{(1,j)}^n + \alpha_{(1)} = -2\alpha_1 T_{(2,j)}^{n+1} + T_{(1,j)}^{n+1} (2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 1) \quad (16)$$

$$\alpha_{(1)} = \alpha_2(T_{1,j-1}^{n+1} + T_{1,j+1}^{n+1})$$

$$d\Phi_{1,j}^n + \beta_{(1)} = 2\alpha_3 T_{2,j}^{n+1} + T_{1,j}^{n+1} 2(-\alpha_3 - \alpha_4) \quad (17)$$

$$\beta_{(1)} = \alpha_4(T_{1,j-1}^{n+1} + T_{1,j+1}^{n+1})$$

$$T_{(1,j)}^n + \theta_{(1)} = -2\alpha_5 T_{(2,j)}^{n+1} + T_{(1,j)}^{n+1} (2\alpha_5 + 2\alpha_6 + 1) \quad (18)$$

$$\theta_{(1)} = \alpha_6(T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1})$$

**2<sup>ème</sup> cas :**

$$T(i, j, t = 0) = T_{amb}, \quad \text{et } T(i = imax, j, t) = T_{amb}$$

**3<sup>ème</sup> cas : les états j=1 et i=2, imax-1**

L'application de schéma explicite des différences finies, sur les équations 10,11 ,12 nous permet d'obtenir les équations suivantes :

$$T_{i,1}^{n+1} = \alpha_1 (T_{i-1,1}^n + T_{i-1,2}^n) + T_{i,1}^n (-2\alpha_1 + 1) + \alpha_1 (T_{i+1,1}^n + T_{i+1,2}^n) + T_{i,2}^n (-2\alpha_1 + 1) - T_{i,2}^{n+1} \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_s}{\rho_s C p_s h x^2}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_s}{\rho_s C p_s h y^2}$$

Pour l'état correspondant au changement de phase (solide- liquide) :

$$d\Phi_{i,1}^{n+1} = \alpha_3 \left( \frac{T_{i-1,1}^n + T_{i+1,1}^n + T_{i+1,2}^n}{2} - T_{i,1}^n - T_{i,2}^n \right) \quad (20)$$

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_s h y}{h x}$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_s h x}{h y}$$

Pour l'état liquide :

$$T_{i,1}^{n+1} = \alpha_5 (T_{i-1,1}^n + T_{i-1,2}^n) + T_{i,1}^n (-2\alpha_5 + 1) + \alpha_5 (T_{i+1,1}^n + T_{i+1,2}^n) + T_{i,2}^n (-2\alpha_5 + 1) - T_{i,2}^{n+1} \quad (21)$$

$$\alpha_5 = \frac{\lambda_l}{\rho_l C p_l h x^2}$$

$$\alpha_6 = \frac{\lambda_l}{\rho_l C p_l h y^2}$$

**4<sup>ème</sup> cas : l'tat j=1 et i = 1**

Par raison de symétrie, nous avons  $T_{i-1,j}^n = T_{i+1,j}^n$ , (on considère que les pièces sont de même métal). Les équations 13, 14,15 sont écrites sous la forme suivante :

$$T_{1,1}^{n+1} = 2\alpha_1 T_{2,1}^n + T_{1,1}^n(-2\alpha_1 + 1) + 2\alpha_1 T_{2,2}^n + T_{1,2}^n(-2\alpha_1 + 1) - T_{1,2}^{n+1} + \gamma_1 \quad (22)$$

$$d\Phi_{1,1}^{n+1} = \alpha_3 (T_{2,1}^n + T_{2,2}^n - T_{1,1}^n - T_{1,2}^n) \quad (23)$$

$$T_{1,1}^{n+1} = 2\alpha_5 T_{2,1}^n + T_{1,1}^n(-2\alpha_5 + 1) + 2\alpha_5 T_{2,2}^n + T_{1,2}^n(-2\alpha_5 + 1) - T_{1,2}^{n+1} + \gamma_2 \quad (24)$$

**5<sup>ème</sup> cas : j = jmax**

Nous proposons pour j = jmax :

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{ou} \quad T_{(i,jmax)}^{n+1} = T_{(i,jmax-1)}^{n+1}$$

## II.5 Forme matricielle des équations différentielles

L'ensemble des équations pour le calcul de  $T_{i,j}$  peut être réécrit sous forme matricielle  $A.X=B$ , où la matrice A est tridiagonale. Le système tridiagonal est tel que :

Nous avons les formes suivantes pour j=1, pour j=2 à Jmax-1 et pour j=Jmax :

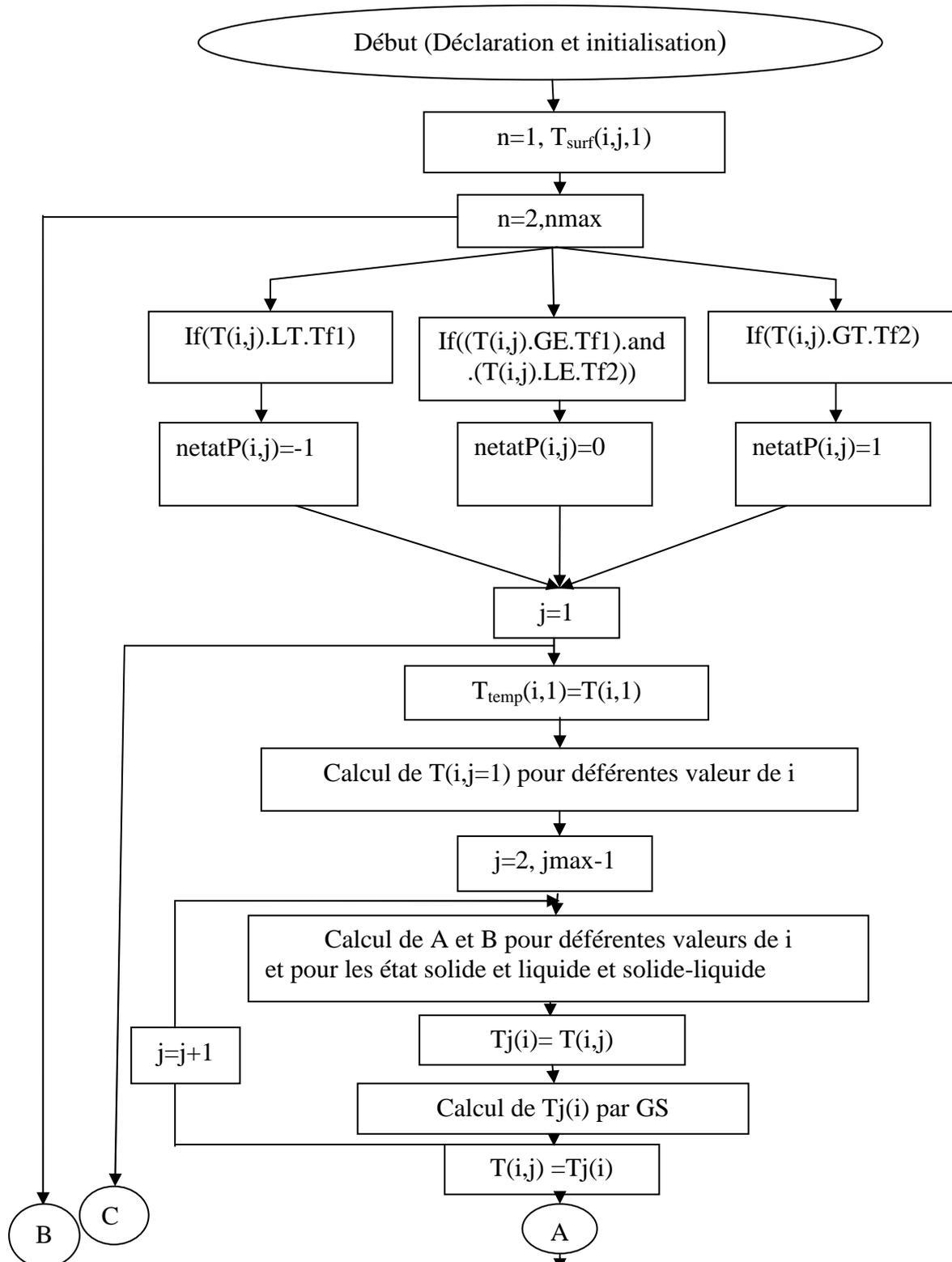
- Pour i = 1: les termes non nuls  $A_{1,1}$  ,  $A_{1,2}$  et  $B_1$  ;
- Pour i = 2 à Imax-1: les termes non nuls  $A_{i-1,i}$  ,  $A_{i,i}$  ,  $A_{i+1,i}$  2 et  $B_i$  ;
- Pour i = Imax: les termes non nuls  $A_{imax,imax} =1$  et  $B_{imax} =T_0$ .

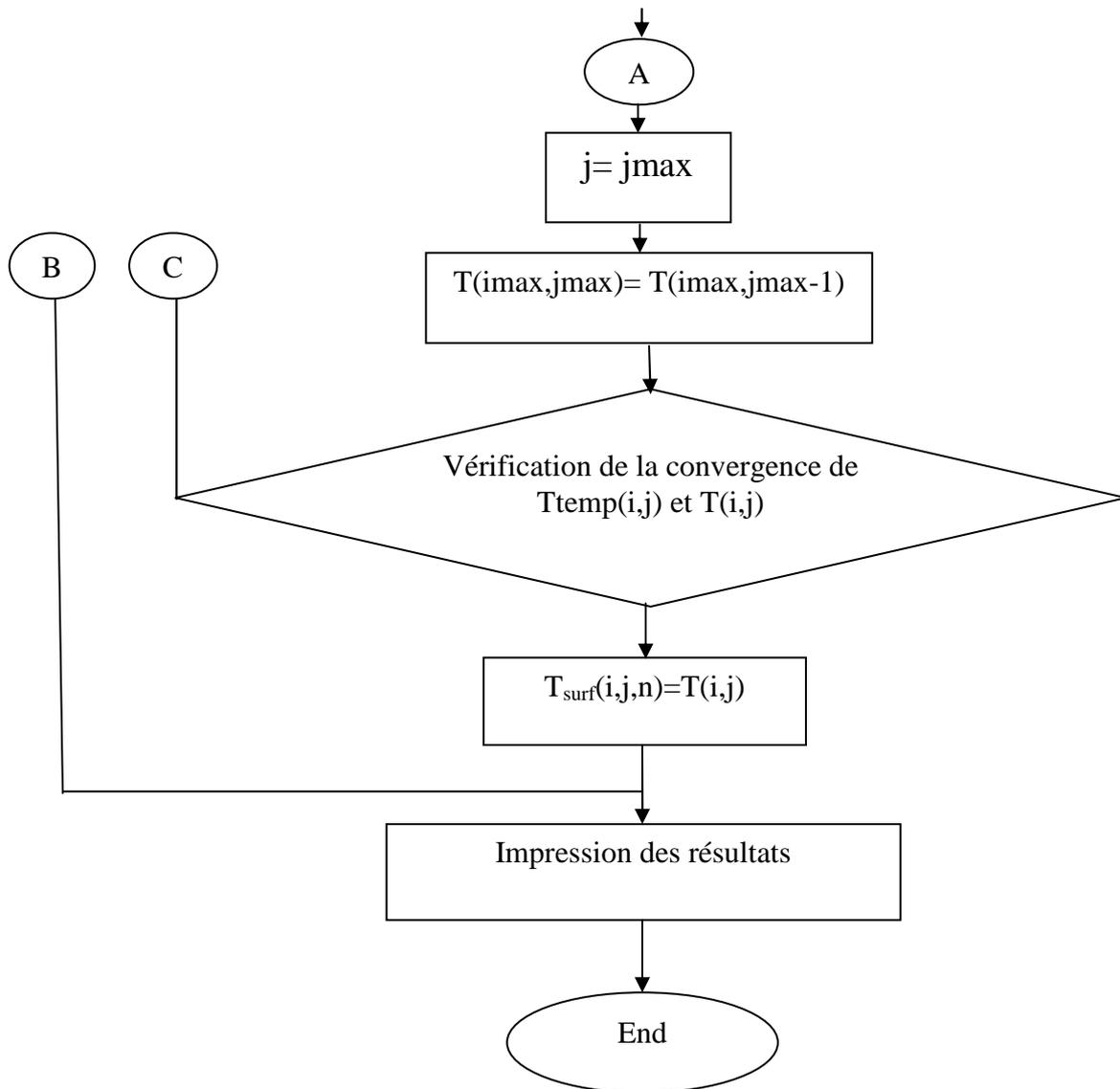
A noter que les éléments de la matrice A et du vecteur B sont des fonctions de la phase solide, liquide ou changement de phase.

On est amené à la résolution du système d'équations matricielles ( $A.X = B$ ) pour la résolution des températures  $T_{i,j}^{n+1}$ . Nous appliquons la méthode itérative de Gauss-Seidel [16].

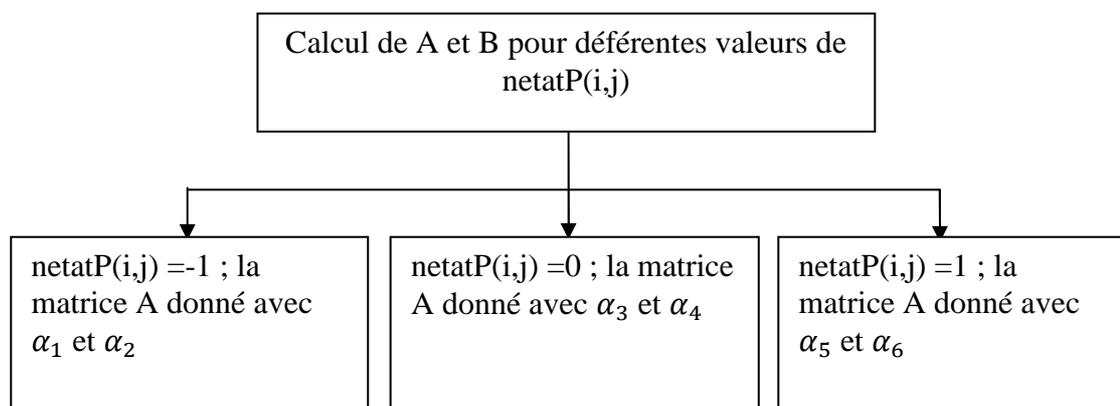
## II.6 Organigramme de calcul de température

La figure suivante représente l'organigramme de calcul de la température tel que  $T_{temp}$  est température temporaire et  $T_{surf}$  est la température à la surface.  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$  sont les températures de fusion.





**Structure du programme pour le calcul de A et B**



## CHAPITRE III

## Chapitre III :

### Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux résultats du modèle numérique pour l'étude de la température à la surface de deux pièces rectangulaires soudées par faisceau laser CO<sub>2</sub> (mobile et immobile). Le faisceau laser fonctionne en mode continu sur la surface symétrique par rapport à l'axe X. Les deux pièces sont composées du même alliage.

#### III.1 Condition de l'opération

L'alliage utilisé pour l'étude du soudage laser de l'alliage de Titane est un ternaire Titane-vanadium de désignation **TA6V4** (6%Al, 4%V) (autrement dit Ti-6Al-4V ou plus simplement Ti64) [17]. Nous avons utilisé les données suivantes :

**Tableau III-1** : Les propriétés physiques de TA6V utilisées dans les calculs [2].

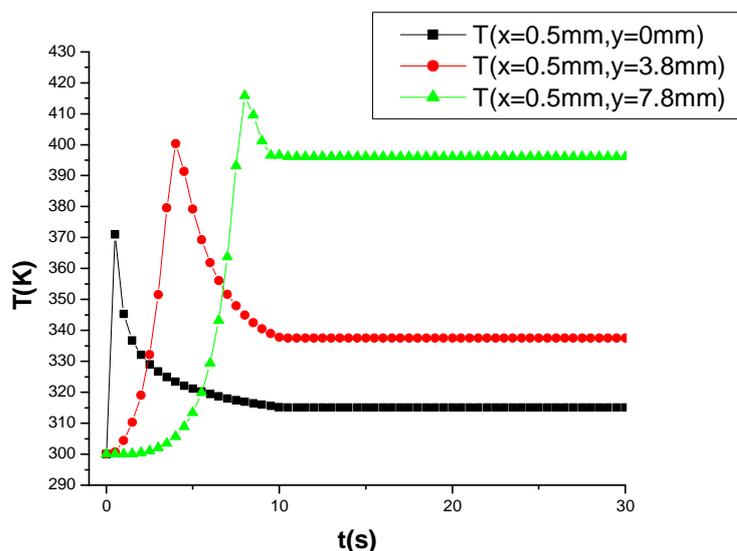
Grandeurs physiques (unité)	Symbole	Valeur
Température de solide (K)	T <sub>S</sub>	1923
Température de liquide (K)	T <sub>L</sub>	1993
Densité (solide) (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub>	4500
Densité (liquide) (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>l</sub>	4100
La capacité calorifique (solide) (J/(kg·K))	C <sub>ps</sub>	610
La capacité calorifique (liquide) (J/(kg·K))	C <sub>pl</sub>	720
La conductivité thermique (solide) (W/(m·K))	k <sub>s</sub>	20
La conductivité thermique (liquide) (W/(m·K))	k <sub>l</sub>	35
La conductivité thermique solide - liquide	k	27.5

Les dimensions de la surface étudiée sont 200mm x 46mm pour chaque plaque. Pour les paramètres de soudage, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

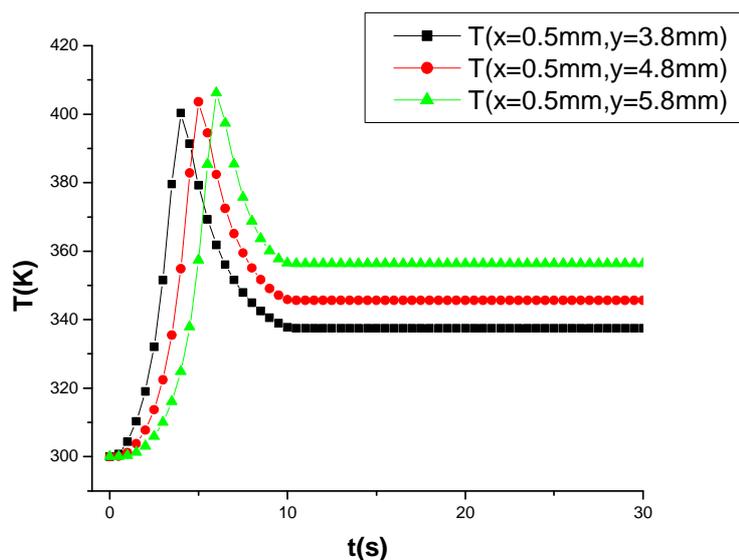
- Longueur d'onde 10,6 μm.
- Puissance du laser : 3 kW.
- Diamètre du laser : 0,4 mm

#### III.2 Vérification des équations et du programme

Pour vérifier la validation de notre programme nous avons choisi de présenter quelques courbes issues de notre travail et nous les avons comparé avec un travail récent de G. Tirand et al. [3]. Les résultats de notre travail sont représentés sur les figures (III.1), (III.2) et (III.3). Ces figures montrent le profil de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon.



**Figure III.1 :** Evolutions de la température en fonction du temps pour différentes positions par rapport à l'axe du cordon.



**Figure III.2 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon.

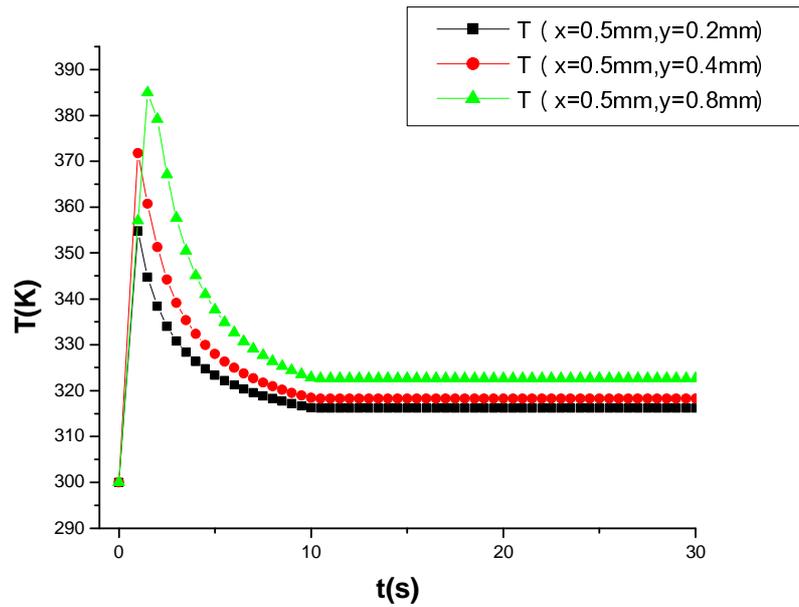
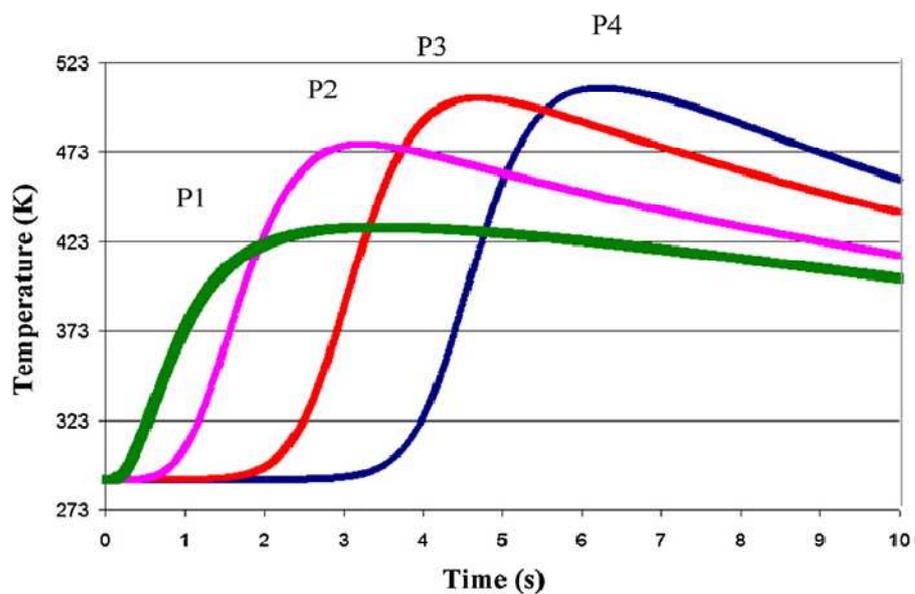
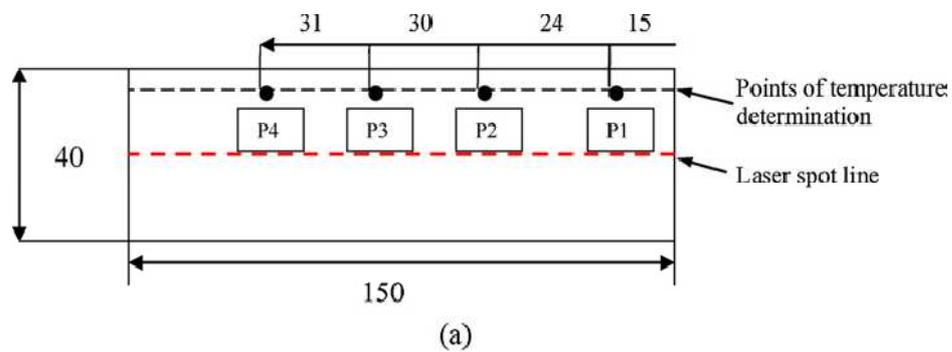


Figure III.3 : Evolutions de la température en fonction du temps pour différentes positions par rapport à l'axe du cordon.

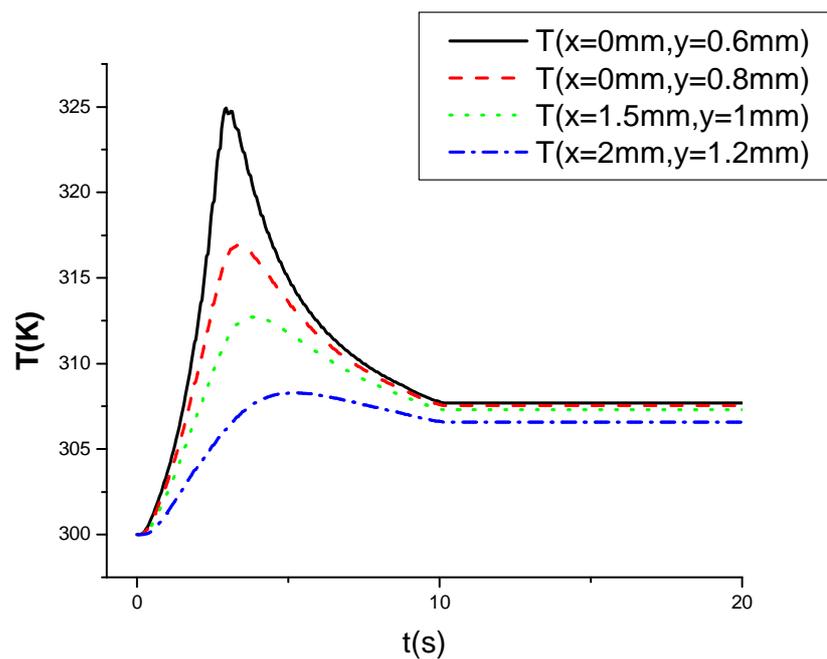


**Figure III.4 :** Températures calculées en fonction du temps. (a) Localisation de détermination de la température (b) Températures calculées [3].

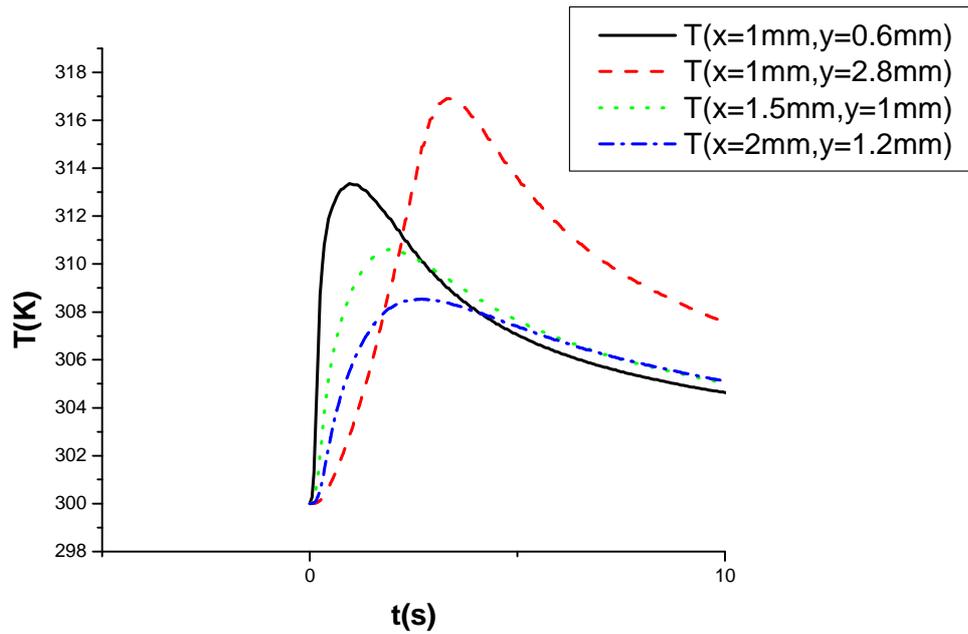
La comparaison entre nos résultats sur les figures (III.1, III.2 et III.3) avec les résultat de G. Tirand et al. montre que les profils des température durant le chauffage et le refroidissement ont la même allure.

### III.3 Variation de la température en fonction de temps pour un laser mobile

Nous présentons sur les figures (III.5), ( III.6) et ( III.7) la variation de la température en fonction du temps.



**Figure III.5 :** Profil de la température en fonction du temps pour différent positions X et Y.



Figure

III.6 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions X et Y.

Sur ces figures on peut observer nettement l'échauffement et le refroidissement de la plaque sur différentes positions.

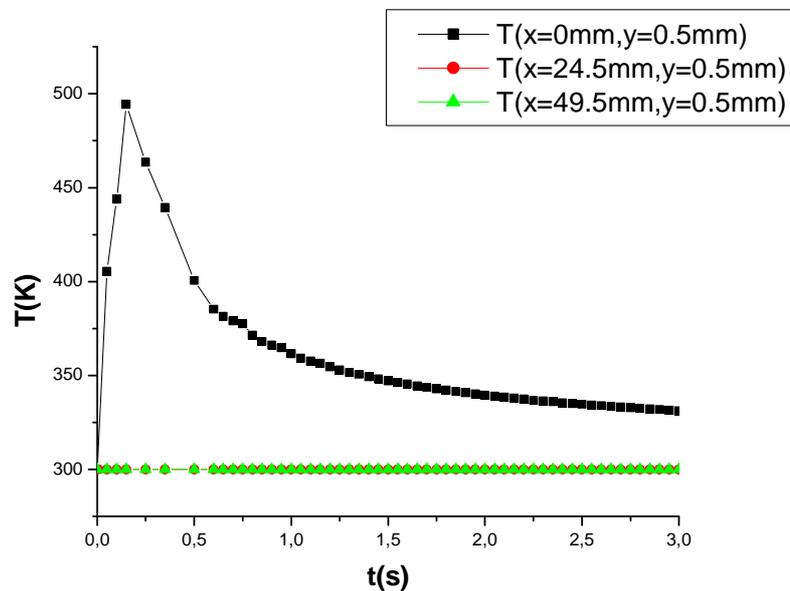


Figure III.7 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions X et Y.

### III.4 Profils de température

#### III.4.1 Profils de température suivant l'axe X

Les figures III.8 à III.10 présentent la variation des profils de la température suivant l'axe X dans des positions différentes de Y et pour des puissances P=700W, 900W, 9000W.

➤ Pour une puissance P= 700W

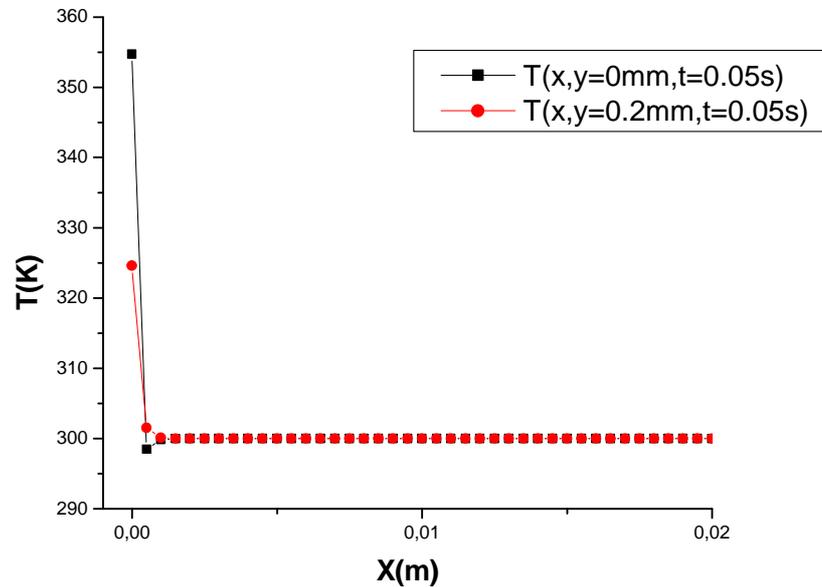


Figure III.8 : Profil de la température suivant l'axe X pour des différentes positions de Y.

➤ Pour une puissance P= 900W

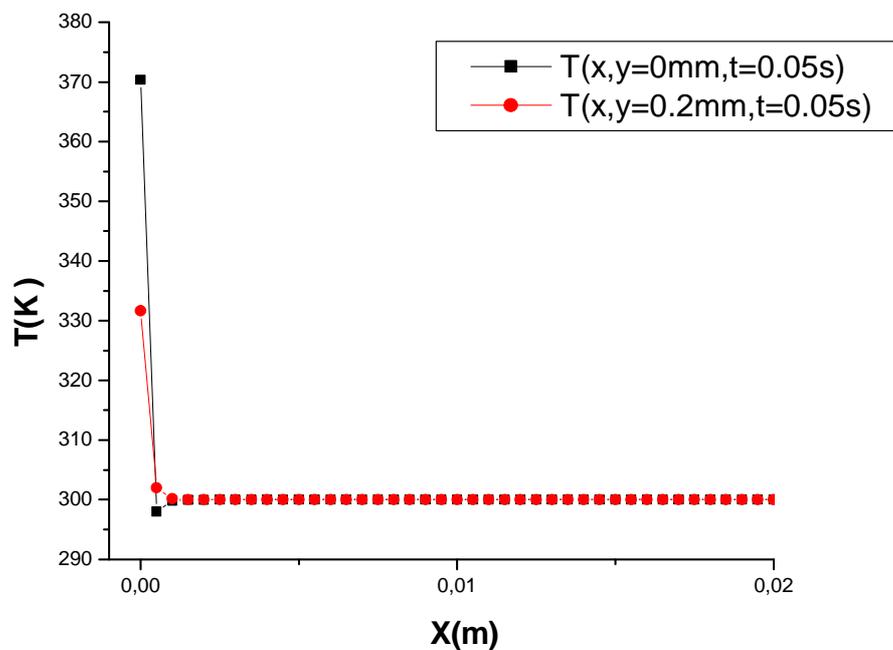


Figure III.9 : Profil de la température suivant l'axe X pour des différentes positions de Y.

➤ Pour une puissance  $P= 9000W$

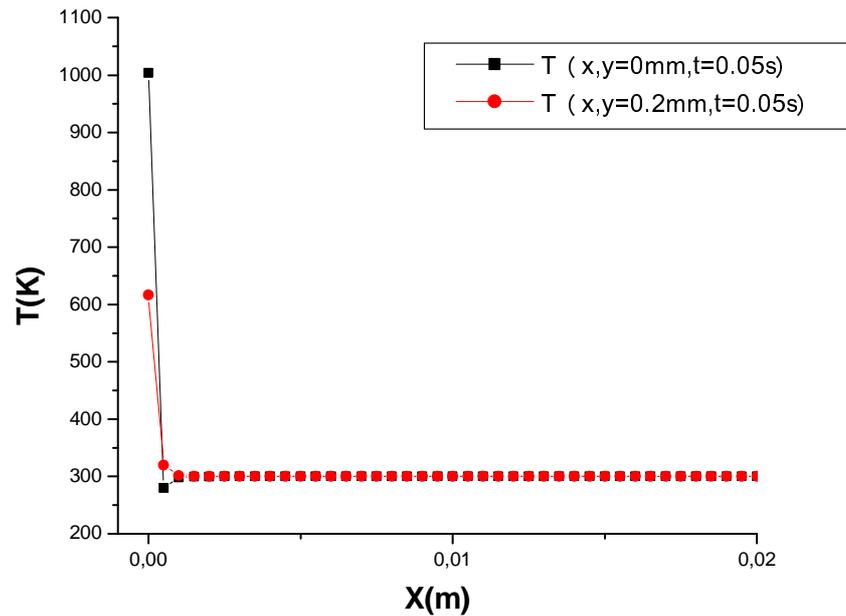


Figure III.10 : Profil de la température suivant l'axe X pour des différentes positions de Y.

### III.4.2 Profils de température suivant l'axe Y

➤ Pour une puissance  $P= 700W$

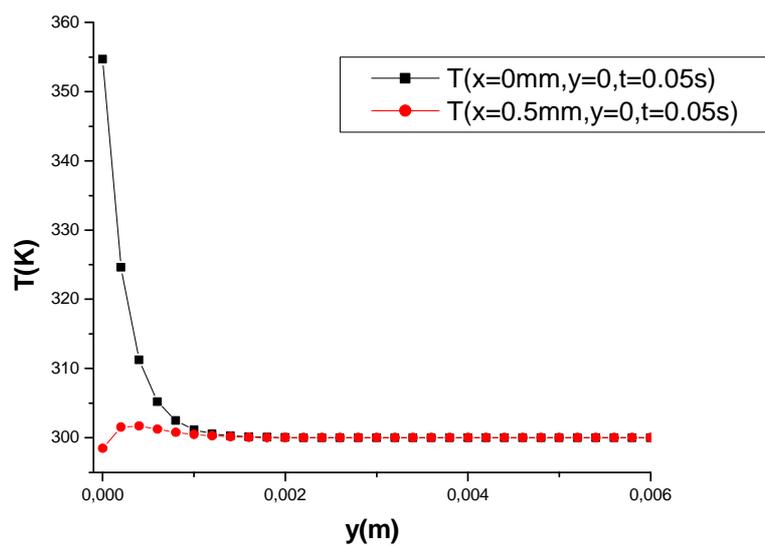


Figure III.11 : Profil de la température suivant l'axe Y pour des différentes positions de X.

➤ Pour une puissance  $P= 900W$

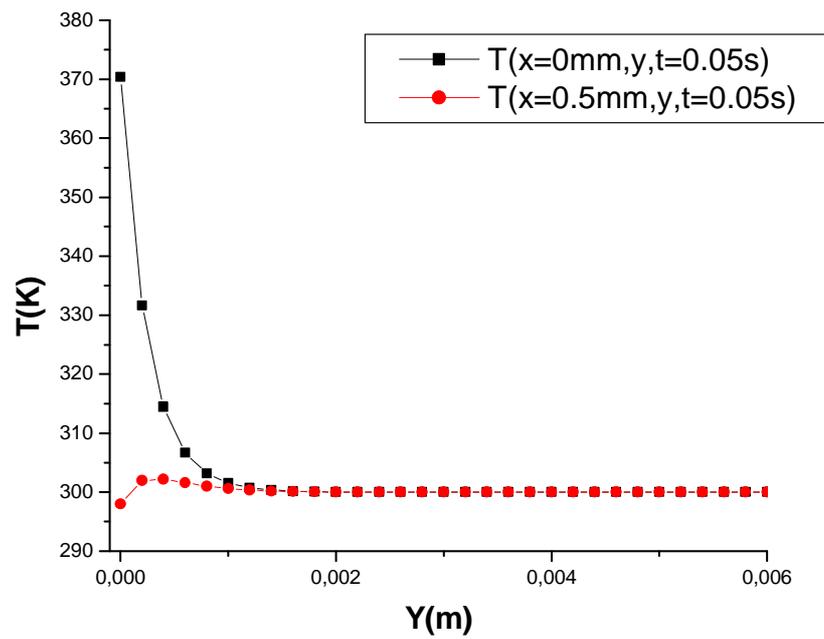


Figure III.12 : Profil de la température suivant l'axe Y pour des différentes positions de X.

➤ Pour une puissance  $P=9000W$

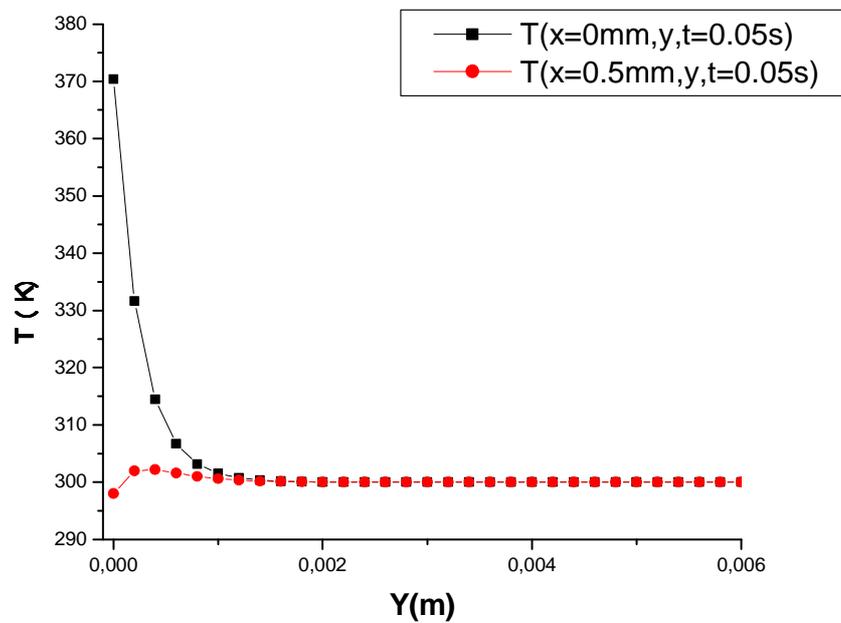


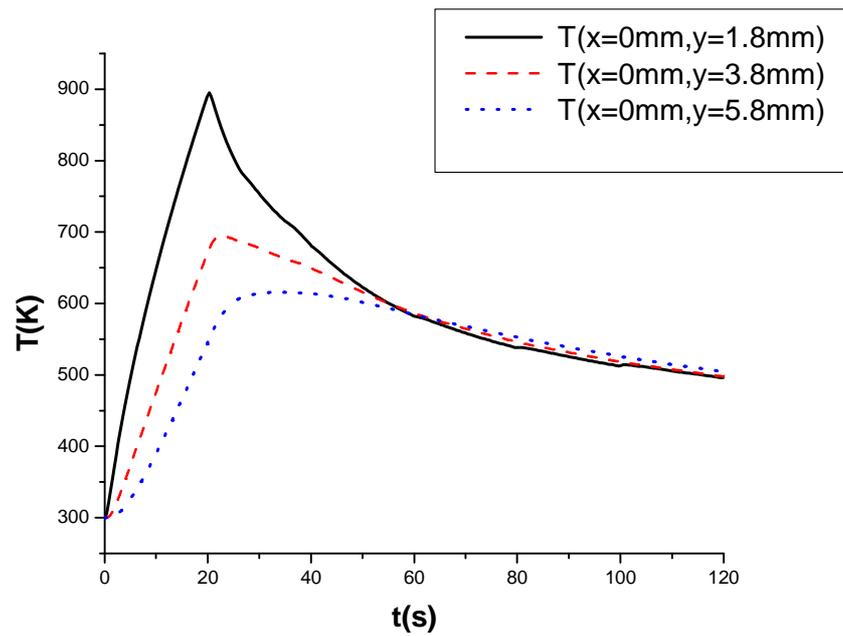
Figure III.13 : Profil de la température suivant l'axe Y pour différentes des positions de X.

Nous remarquons que la température atteint des valeurs plus élevées pour des puissances plus grandes pour différentes positions X et Y.

### **III.4.3 L'impact de la vitesse du laser sur la température suivant le temps pour une puissance $p=1000W$**

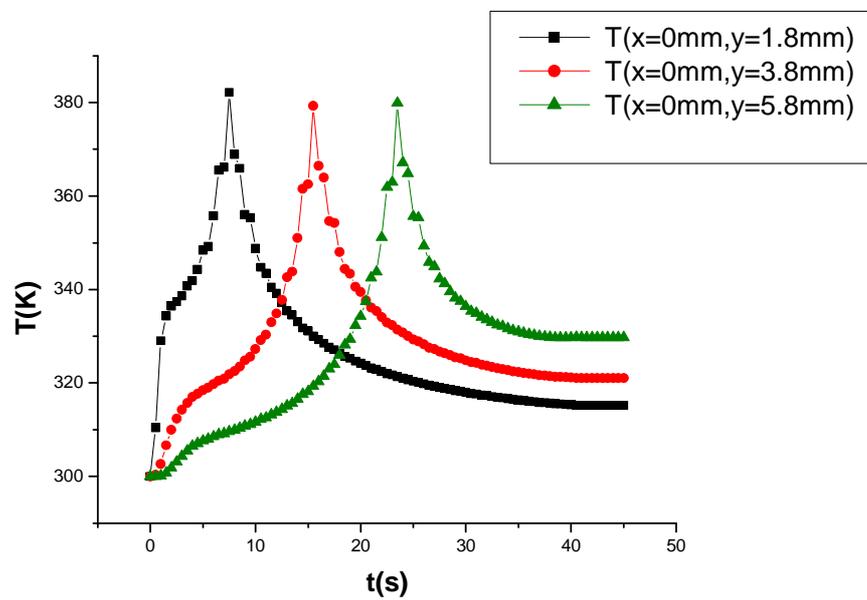
Sur les figures (III-14), (III-15), (III-16) et (III-17) on présente les variations de température en fonction du temps pour différentes valeurs de vitesse.

➤  $v = 0.1\text{mm/s}$



**Figure III.14 :** Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions ( $v=0.1\text{mm/s}$ ).

➤  $v = 0.25\text{mm/s}$



**Figure III.15 :** Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions ( $v=0.25\text{mm/s}$ ).

➤  $v = 0.5\text{mm/s}$

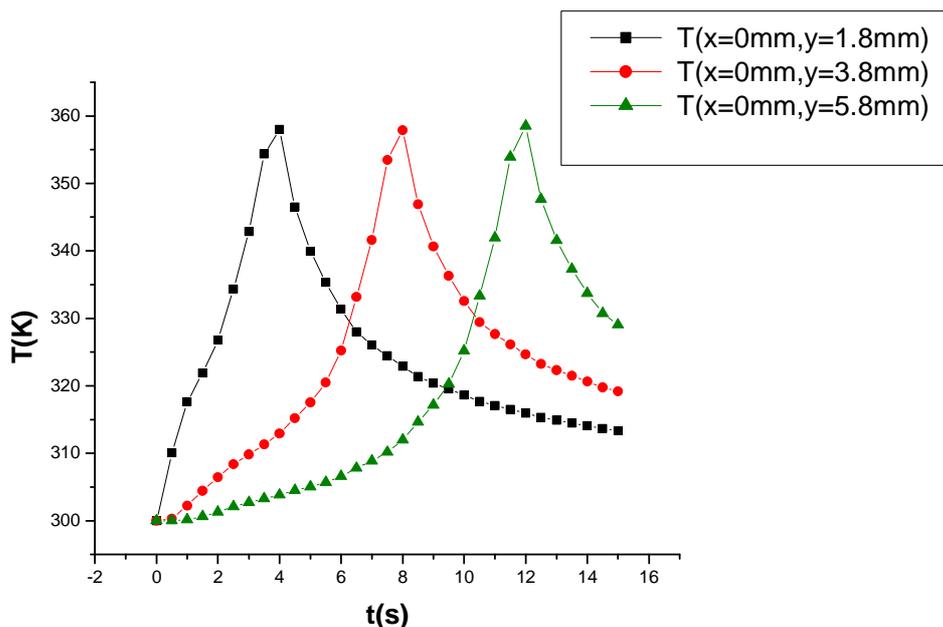


Figure III.16 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions ( $v=0.5\text{ mm/s}$ )

➤  $v = 0.7\text{ mm/s}$

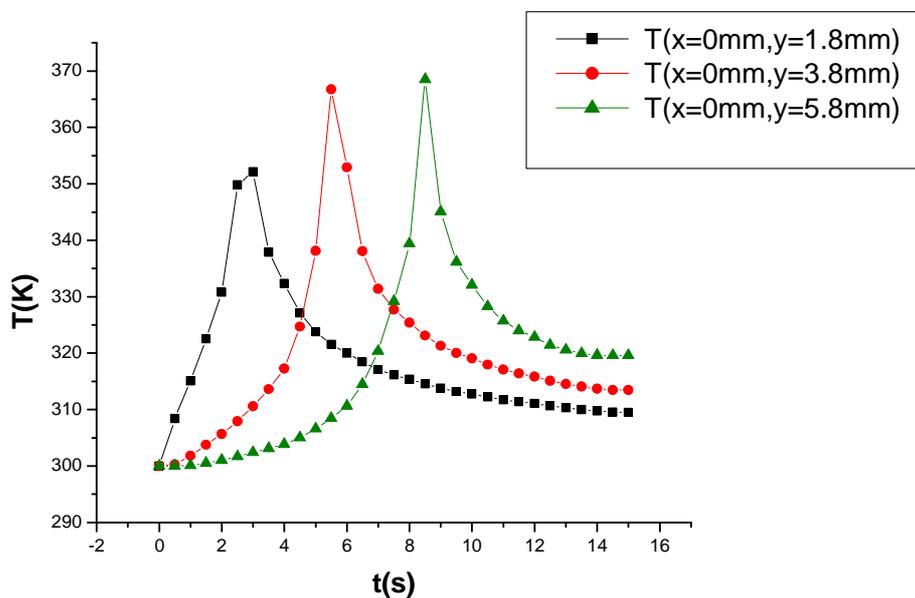
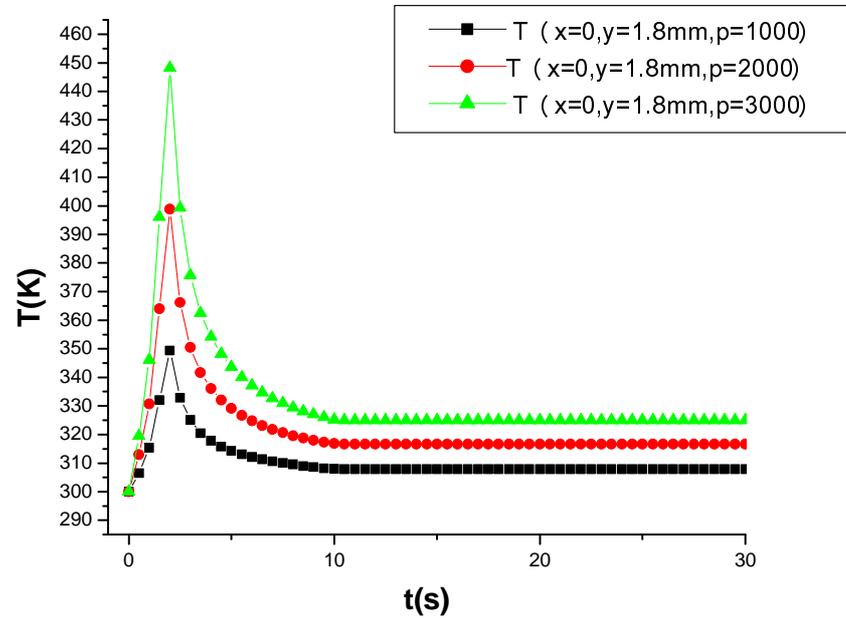


Figure III.17 : Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions ( $v=0.7\text{ mm/s}$ )

On remarque que pour des faibles vitesses les positions proches du point  $(x=0, y=0)$  atteignent des température plus élevées.

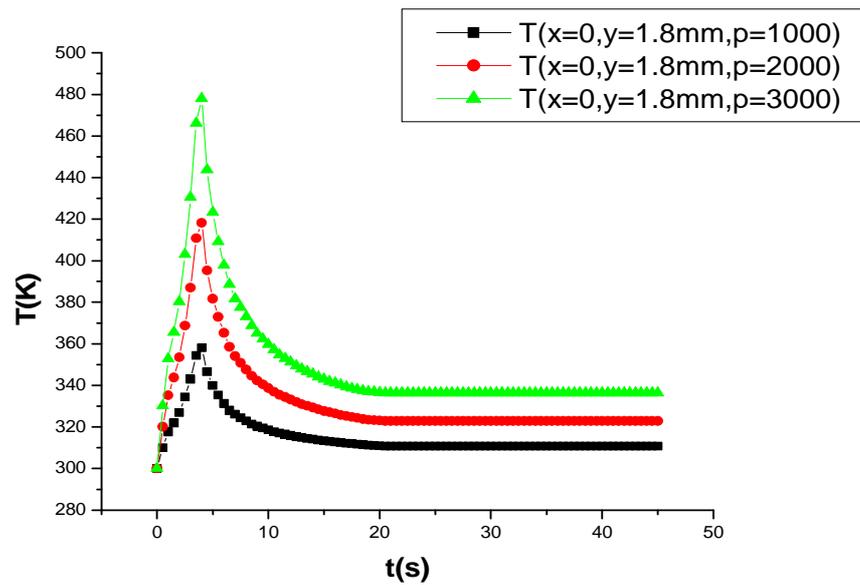
### III.4.4 L'impact de la puissance sur la température suivant le temps pour différentes valeurs de la vitesse.

➤  $V=0,001$  m/s



**Figure III. 18 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeurs de puissance.

➤  $V=0,0005$  m/s

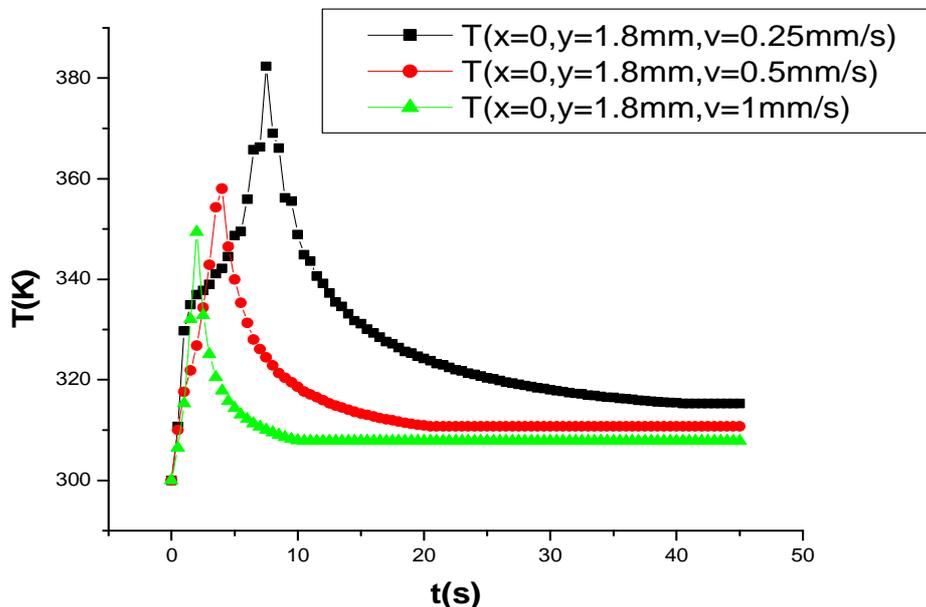


**Figure III.19:** Evolutions de la température en fonction du temps pour différentes positions par rapport à l'axe du cordon et pour différentes valeurs de puissance.

Nous remarquons qu'il ya un effet de la puissance sur la température suivant à l'axe Y : la température est plus élevée pour des puissances plus grandes.

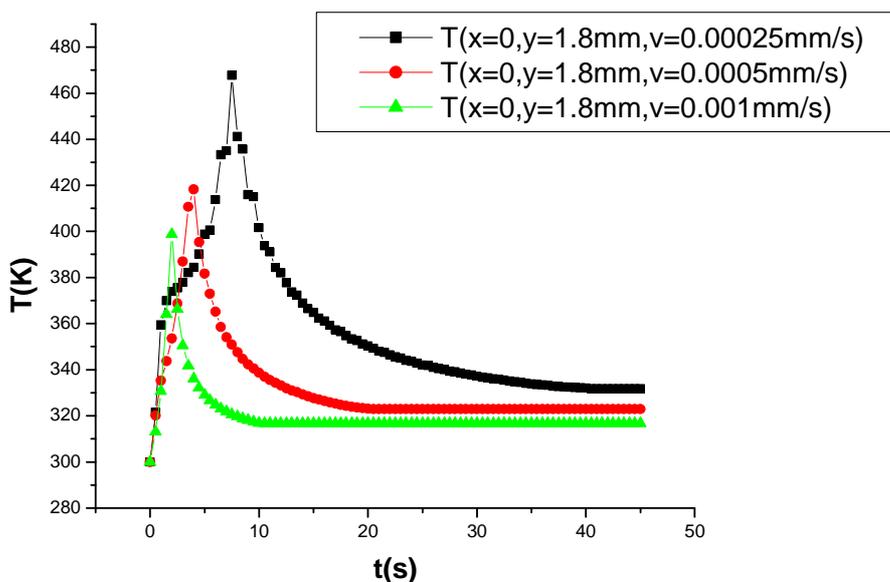
### III.4.5 L'impact de la vitesse du laser sur la température suivant le temps pour différents valeurs de la puissance.

➤  $P=1000w$



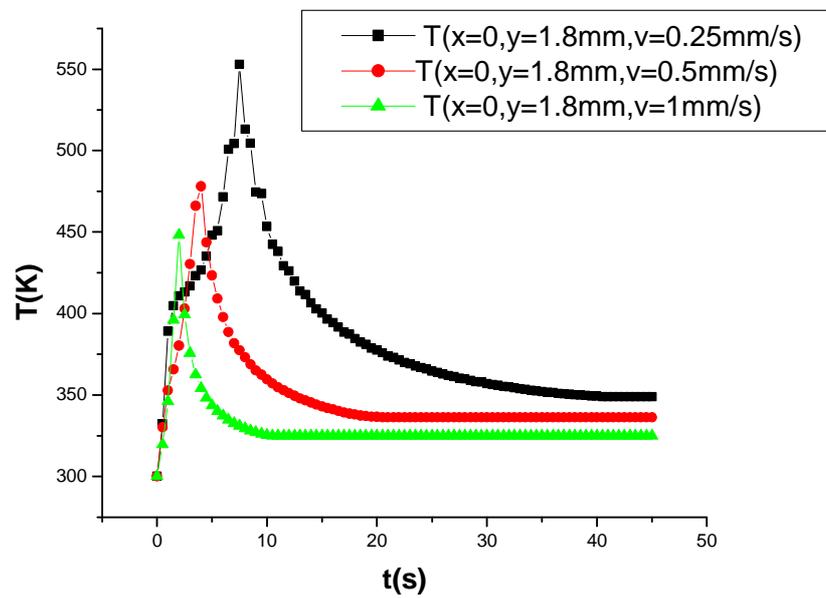
**Figure III. 20 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeurs de vitesse.

➤  $P=2000w$

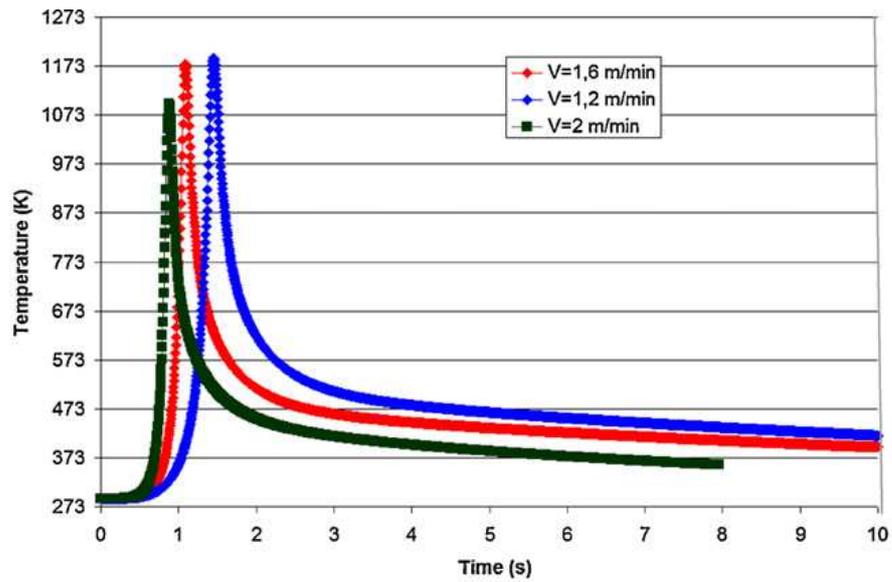


**Figure III. 21 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeurs de vitesse.

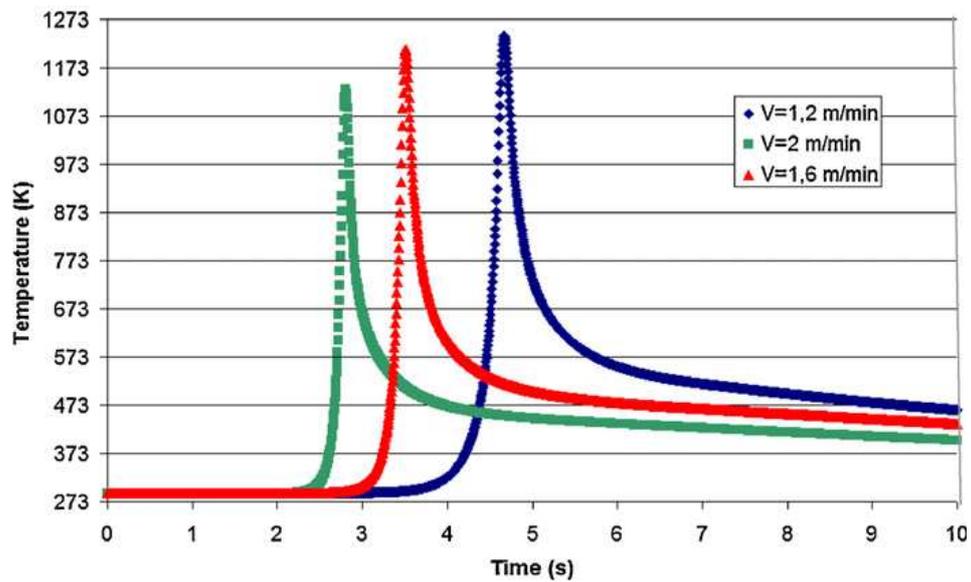
➤ P=3000w



**Figure III. 22 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon et différentes valeurs de vitesse.



(a)

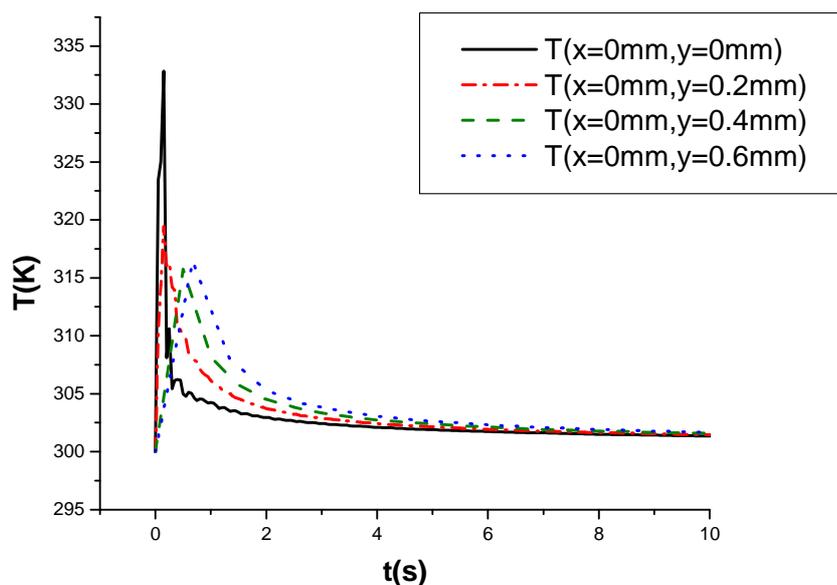


(b)

**Figure III. 23 :** Températures calculées en fonction du temps en un point de la ligne de soudure pour trois conditions de soudage :(a) régime transitoire et (b) régime permanent [3].

La comparaison entre nos résultats sur les figures (III.20), (III.21) et (III.22) avec la figure (III.23), montre un bon accord.

### III.4.6 Calcul de la vitesse de chauffage et de refroidissement



**Figure III.24 :** Profil de la température en fonction du temps pour différentes positions Y.

➤ **Vitesse de chauffage**

$$V_{\text{chau moy}}|_{x=0, y=0\text{mm}} = 0.15(K/s)$$

$$V_{\text{chau moy}}|_{x=0, y=0.2\text{mm}} = 0.09(K/s)$$

$$V_{\text{chau moy}}|_{x=0, y=0.4\text{mm}} = 0.05(K/s)$$

$$V_{\text{chau moy}}|_{x=0, y=0.6\text{mm}} = 0.03(K/s)$$

➤ **Vitesse de refroidissement**

$$V_{\text{reffr moy}}|_{x=0, y=0} = 0.30(K/s)$$

$$V_{\text{reffr moy}}|_{x=0, y=0.2\text{mm}} = 0.18(K/s)$$

$$V_{\text{reffr moy}}|_{x=0, y=0.4\text{mm}} = 0.10(K/s)$$

$$V_{\text{reffr moy}}|_{x=0, y=0.6\text{mm}} = 0.06(K/s)$$

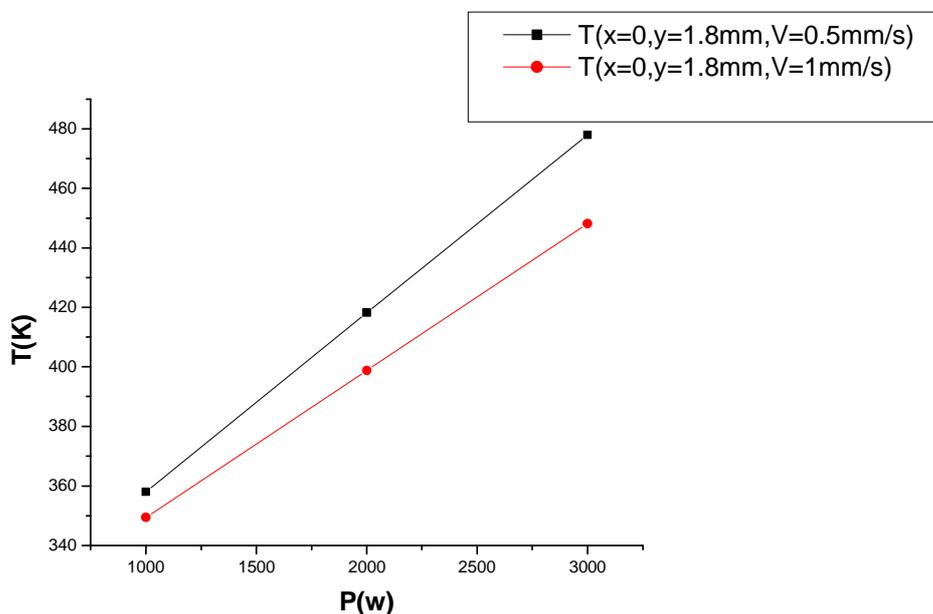
Nous remarquons que les vitesses de chauffage et de refroidissement deviennent plus petites en s'éloignant du point  $x=0, y=0$ .

**III.4.7 Variation de température maximale suivant la puissance et la vitesse**

**Tableau III.2 :** La variation de température maximale dans la position  $x=0$  et  $y=1.8\text{mm}$  suivant la puissance pour différentes valeurs de vitesse

	V=0.5 (mm/s)	V=1.0 (mm/s)
T (x=0mm, y=1.8mm, p=1000w)(K)	358.0169	3439289.

T (x=0mm,y=1.8mm,p=2000w)(K)	418.2255	398.788
T (x=0mm,y=1.8mm,p=3000w)(K)	478.0033	448.1832

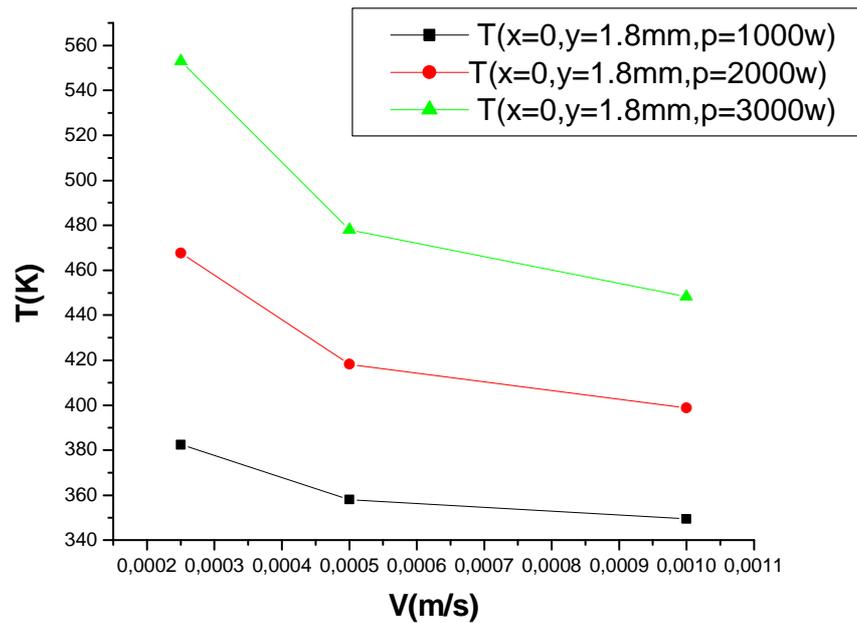


**Figure III.25 :** Variation de la température maximale en fonction de la puissance pour différentes valeurs de vitesse.

Nous remarquons que la variation de la température maximale suivant la puissance est linéaire.

**Tableau III.3 :** La variation de température maximale pour la position x=0 et y=1.8mm suivant la vitesse pour différentes valeurs de puissance

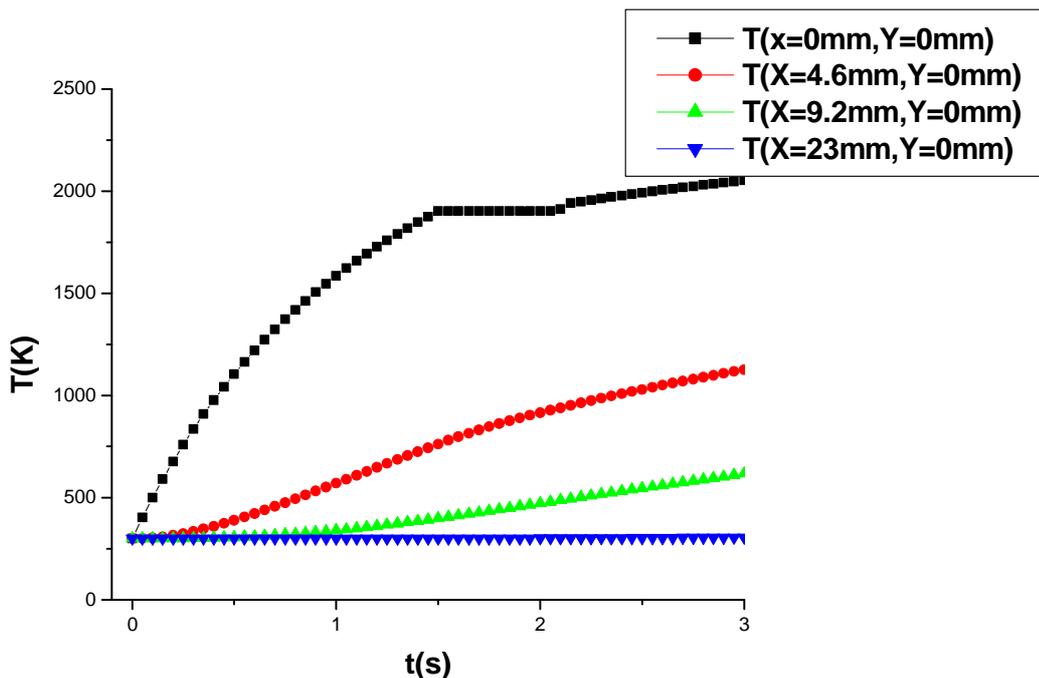
	P=1000(W)	P=2000(W)	P=3000(W)
T (x=0mm,y=1.8mm,V=0.25mm/s)(K)	382.3791	467.7063	552.9739
T (x=0mm,y=1.8mm,V=0.5mm/s)(K)	358.0169	418.2255	478.0033
T (x=0mm,y=1.8mm,V=1mm/s)(K)	349.3928	398.788	448.1832



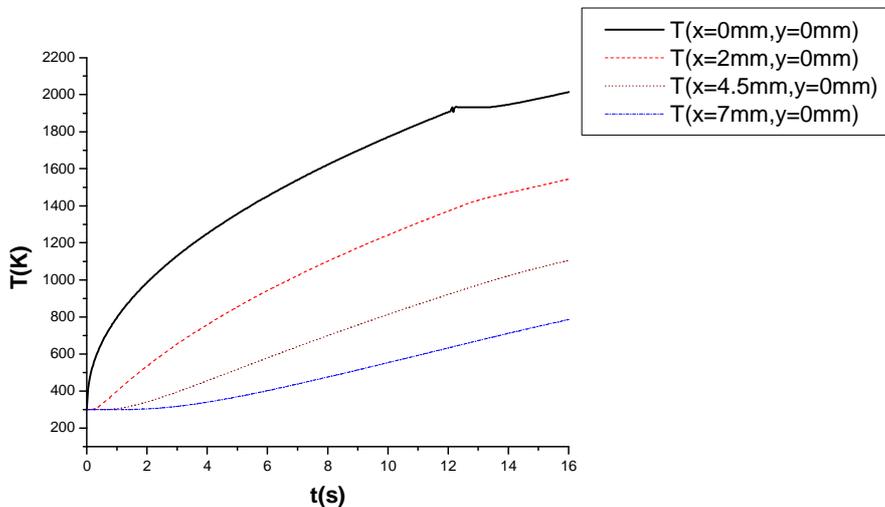
**Figure III.26** : Profil de la température maximale suivant la vitesse pour différentes valeurs de puissance

Nous remarquons une variation non linéaire de la température maximale suivant la vitesse ; pour les petites vitesses la variation est rapide et pour les grandes vitesses la variation est lente.

### III.5 Variation de température en fonction du temps pour un laser immobile



**Figure III. 27 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe du cordon.



**Figure III. 28 :** Evolutions de la température en fonction du temps à différentes positions par rapport à l'axe X et différentes valeurs de puissance.

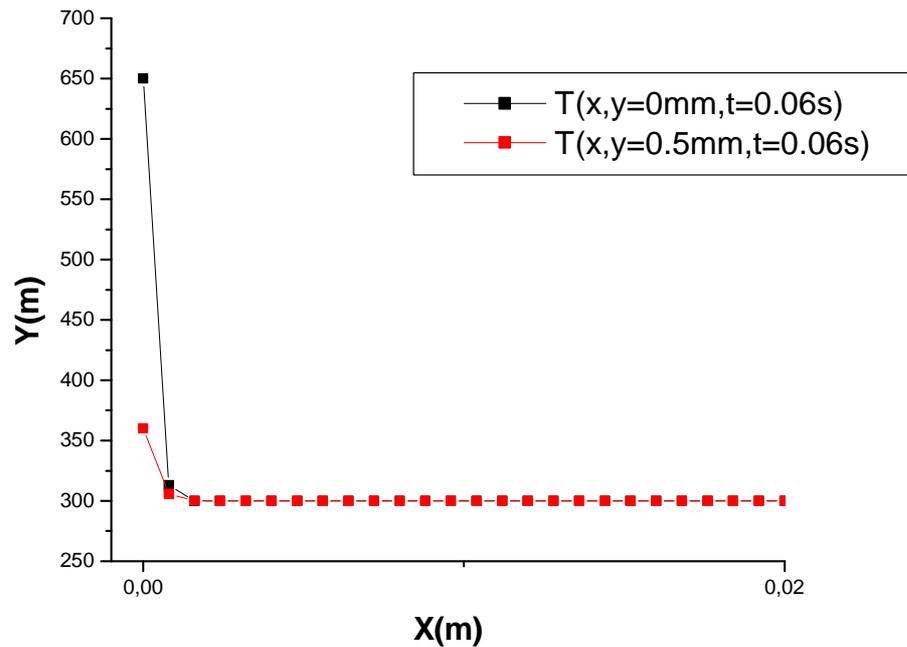
Pour le point  $(x=0, y=0)$  la température augmente en fonction du temps, elle atteint la température de fusion à l'instant  $t=1.4$  s. On voit que la courbe présente un palier de changement d'état ; la température reste à  $T_f$  tout le temps que la phase solide et la phase liquide sont en présence ensemble sur l'intervalle  $[1,4s \text{ à } 2,2s]$ .

### III.5.1 Profils de température en fonction de X et Y

#### III.5.1.1 Profils de température suivant l'axe X

Les figures III.29 à III.33 présentent la variation des profils de la température suivant l'axe X dans des positions différentes de Y et pour des puissances  $P=5000\text{W}$ ,  $4000\text{W}$ ,  $3000\text{W}$ .

- Pour une puissance  $P= 5000\text{W}$



**Figure III-29:** Profil de la température suivant l'axe X à l'instant  $t=0.06\text{s}$

➤ Pour une puissance  $P= 4000W$

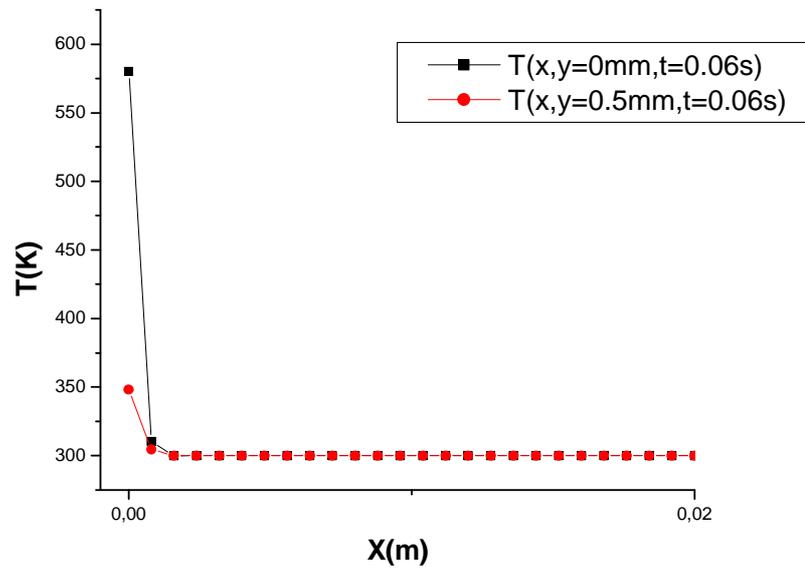


Figure III.30 : Profil de la température suivant l'axe X dans à l'instant  $t=0.06s$

➤ Pour une puissance  $P= 3000W$

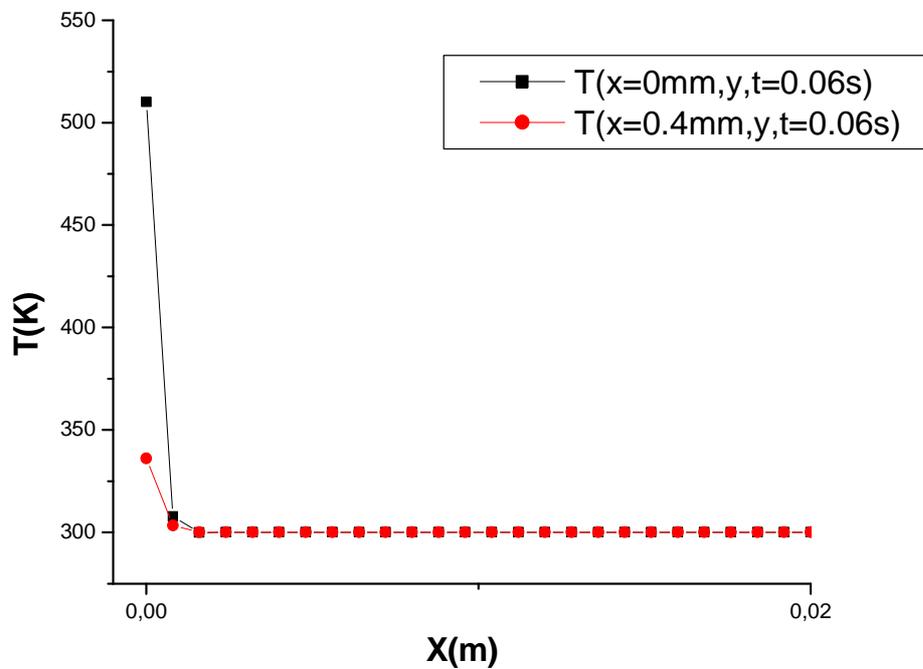
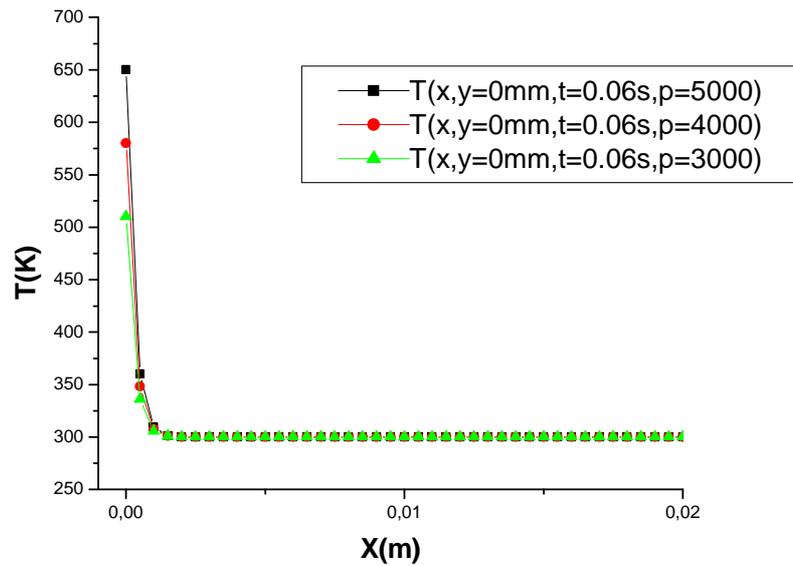
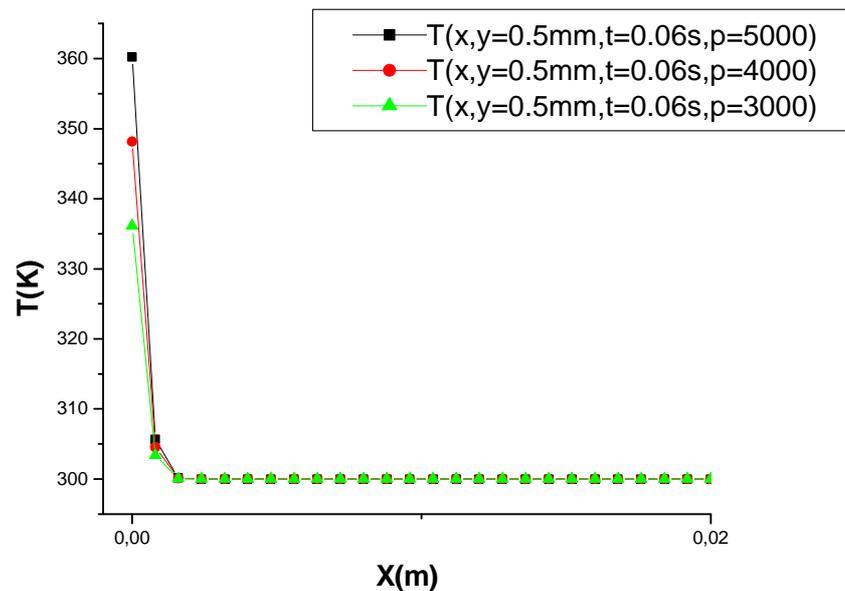


Figure III.31 : Profil de la température suivant l'axe X à l'instant  $t=0.06s$ .



**Figure III.32 :** Profil de la température suivant l'axe X pour différentes valeurs de puissance sur  $y=0$ .



**Figure III-33:** Profil de la température suivant l'axe X pour différentes valeurs de puissance sur  $y=0.5$  mm.

Nous remarquons que la distribution des températures suivant à l'axe X atteint des valeurs plus élevés pour des grandes valeurs de puissance pour différentes positions

### III.5.1.2 Profils de température suivant l'axe Y

Les figures III.34 à III.38 présentent la variation des profils de la température suivant l'axe Y dans des positions différentes de X et pour des puissances  $P=5000\text{W}$ ,  $4000\text{W}$ ,  $3000\text{W}$

➤ Pour une puissance  $P= 5000\text{W}$

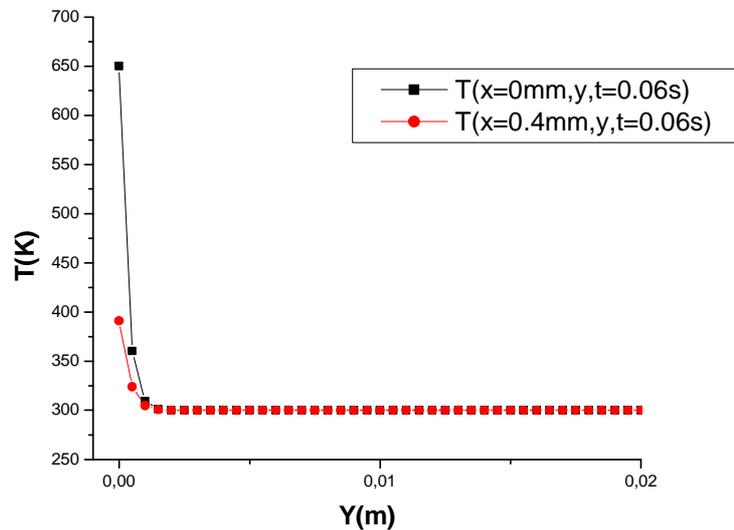


Figure III.34 : Profil de la température suivant l'axe Y dans des positions différentes de X.

➤ Pour une puissance  $P= 4000\text{W}$

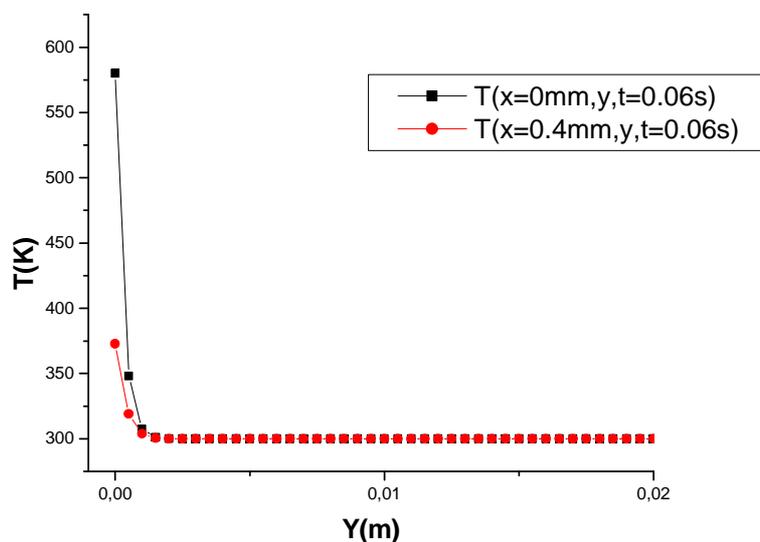


Figure III.35 : Profil de la température suivant l'axe Y pour différentes des positions de X.

➤ Pour une puissance  $P= 3000W$

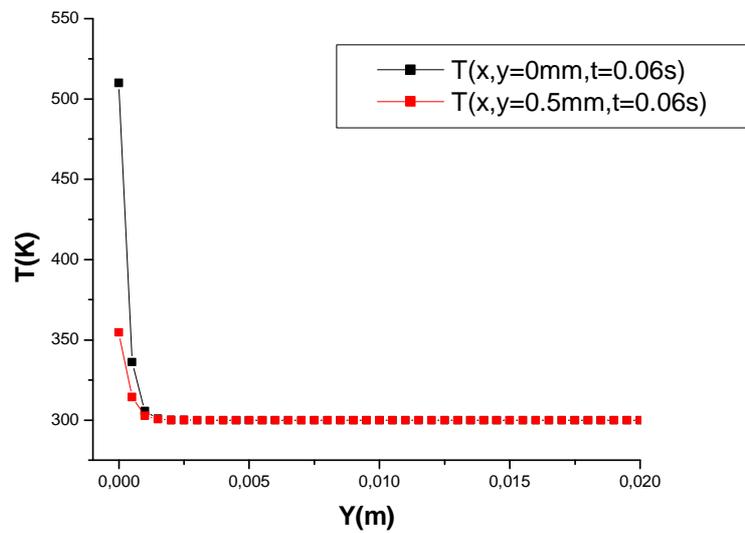


Figure III-36 : Profil de la température suivant l'axe Y pour différentes des positions de X.

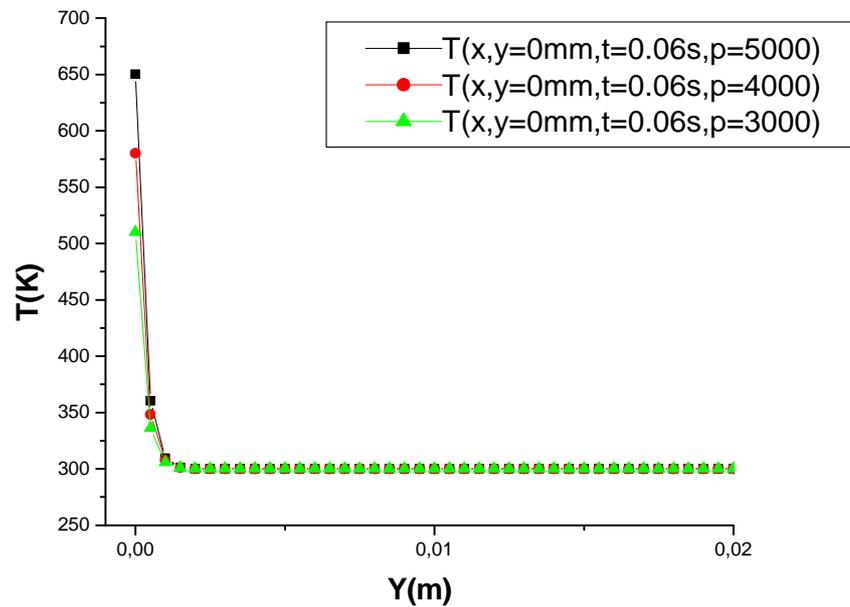
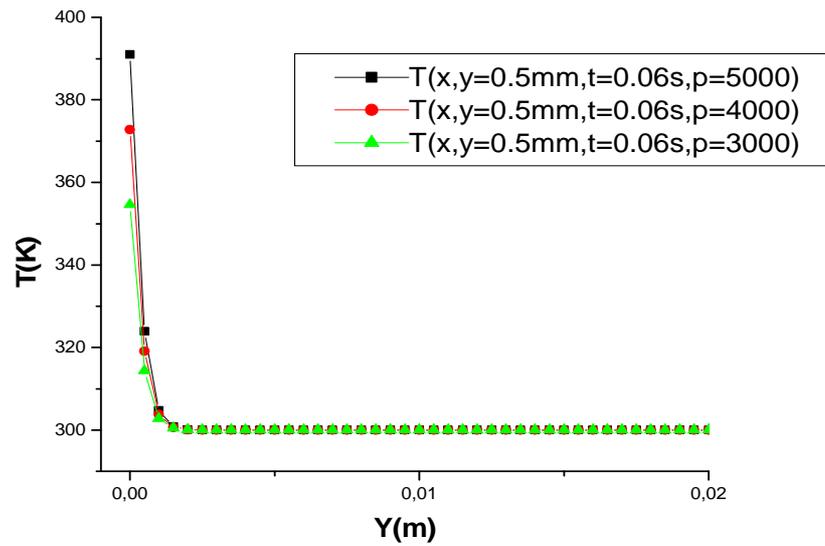


Figure III.37 : Profil de la température suivant l'axe Y pour des différentes positions de X.



**Figure III.38** : Profil de la température suivant l'axe Y pour différentes des positions de X.

Nous remarquons que la température atteint des valeurs plus élevée pour des puissances plus grandes pour différentes positions X et Y.

CONCLUSION GENERALE ET

PERSPECTIVES

### Conclusion générale et perspectives

Dans ce mémoire nous avons étudié l'opération de soudure par laser CO<sub>2</sub> en mode continu sur une surface symétrique par rapport l'axe X, et composée de deux pièces de même alliage. L'alliage utilisé est l'alliage de titane (TA6V). Les conditions expérimentales de soudure sont celles de Y. Robert (2007).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage et en particulier le soudage par laser. Une importance particulière est donnée aux diagrammes de changement de phases suivant les températures. Les structures des matériaux dépendent énormément de la composition des matériaux et des modes de chauffage et de refroidissement. On a présenté les équations de conservation nécessaires pour l'étude des fluides en particulier l'équation de l'énergie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté de la modélisation numérique pour le calcul de la température au niveau de la surface des matériaux à souder. Le traitement de la phase de fusion a été traité pendant le chauffage du matériau. Le spot laser est en mouvement avec une vitesse donnée. 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 en utilisant l'équation de la diffusion de la chaleur suivant les positions et suivant le temps.

Le troisième chapitre est destiné à l'analyse des résultats de la modélisation. Un intérêt particulier est fait pour l'étude du début de la soudure et le traitement de la phase de fusion pendant le chauffage du matériau. Des comparaisons sont faites avec des résultats expérimentaux de G. Tirand (2013), nous avons remarqué un bon accord.

Nous a avons fait des comparaisons entre notre étude et des études précédentes. Nous avons fait une comparaison avec les résultats de G. Tirand et al. (2013). L'étude de G. Tirand et al. présente le profil de la température en fonction du temps pour différentes positions par rapport à l'axe du cordon. La comparaison montre que les profils des température durant le chauffage et le refroidissement ont la même allure.

Nous avons fait une étude paramétrique présentant l'effet de quelques grandeurs et paramètre :

- La distribution de la température dépend de la puissance et la vitesse du laser ;

- Calcul des vitesses de chauffage et de refroidissement dans différents points de la plaque (structure du matériau).

Aux limites des températures de fusion, nous avons pu arriver à la courbe qui présente 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 3 dimensions.
- Introduire la diffusion de la chaleur dans l'air.
- Propriétés physiques des matériaux non constantes.

**RÉFÉRENCE**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

**Références**

- [1] K. Lann ; “ *Les applications des lasers dans l’industrie* ”; Centre d’études techniques en productique et mécatronique C/O Ecole Louis De Broglie, **Vol. N°7**, 1-6 (2007).
- [2] Y. Robert ; “ *Simulation numérique de soudage TA6V par laser YAG impulsif : caractérisation expérimentale modélisation aspects thermomécanique ass à ce procédé* ” ; Doctorat de l’Ecole des Mines de Paris (2007).
- [3] G. Tirand, C. Arvieu, E. Lacoste et J. M. Quenisset ; “ *Control of aluminium laser welding conditions with the help of numerical modeling* ”; Université de Bordeaux, France, *Journal of Materials Processing Technology*, **213**, 337–348 (2013).
- [4] 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).
- [5] F. Nicolas ; “ *Le laser et son application en interférométrie* ”; (2005).
- [6] L. Blais ; “ *Introduction au soudage laser* ”; Centre spécialisé de technologie physique du Québec inc (2006).
- [7] R. CAZES ; “ *Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d’électrons et laser* ”; **B 7 740**, 3-13 (2007).
- [8] P. DI NAPOLI ; “ *Modélisation des évolutions microstructurales par changement de phases dans les alliages de titane B-métastables* ”; thèse de Doctorat, Université de NANCY (2010).
- [9] <http://www.industrial-lasers.com>.
- [10] J. Ronda et A. Sixek ; “ *Modelling of laser welding processing the phase of keyhole formation* ”; University of Science and Technology, Poland, *Archives of civil and mechanical engineering*, **Vol. N°3**, 742 (2011).
- [11] B. Morgan ; “ *Mécanique des fluides* ”; Résumé de Cours, Ecole Normale Supérieure de Cachan (2009).
- [12] J. Brau ; “ *Conduction* ” ; INSA de LYON (2006).
- [13] C. Vanhille, A. Lavie et C. Pozuelo ; “ *Modélisation numérique en mécanique* ”; Ed. Lavoisier, Paris (2007).
- [14] M. Sibony et J. C. Mardon ; “ *approximations et équation différentielles* ”; Ed. Hermann, France (1982).
- [15] H. Makhlof ; “ *Modélisation numérique du soudage à l’arc des aciers* ”; Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris (2008).

[16] O. K. Babahani ; “ *Contribution à l’étude des plasmas lors de déposition sur couche mince par procédés CVD* ”, Mémoire de magister, Université de Ouargla (2004).

[17] G. Roméo ; “ *Comportement tribologique d’un alliage de titane traité et/ou revêtu en fretting à débattement libre* ”; Thèse de Doctorat, Université de Toulouse (2007).

**Résumé:**

Le soudage au laser est largement utilisé dans l'industrie et le traitement des matériaux. Dans notre travail nous avons utilisé un laser CO<sub>2</sub> dans les deux cas fixe et mobile pour le soudage de deux plaques identiques d'alliage de titan (TA6V). Nous proposons un modèle numérique sous le langage de FORTRAN pour déterminer la distribution de température à la surface en fonction du temps. Pour cela, nous avons utilisé les équations de conservation de l'énergie et le débit de la chaleur. Pour la résolution numérique nous avons utilisé la méthode des différences finies et l'algorithme de Gauss-Seidel. L'état du matériau passe par les phases solide et liquide. La comparaison entre les résultats obtenus avec les résultats publiés précédemment a montré un accord acceptable. Nous pouvons utiliser nos résultats afin de trouver la vitesse de refroidissement et la vitesse de chauffage.

**Mots-clés:**

Soudage au laser, Conservation de l'énergie, Méthode des différences finies, Changement de phase, Débit, Fusion, Vitesse de refroidissement.

**دراسة التلحيم بالليزر في حدود درجة حرارة الانصهار****ملخص:**

يستعمل التلحيم بالليزر بشكل كبير في الصناعة ومعالجة المواد. في دراستنا هذه استعملنا ليزر CO<sub>2</sub> المستمر في الحالتين الساكن والمتحرك من أجل تلحيم صفيحتين متماثلتين (TA6V). ولقد قمنا باقتراح نموذج عددي بلغة الفورتون يمكننا من إيجاد توزيع درجة الحرارة في كل موضع وكل لحظة على سطح صفيحة. من أجل ذلك استعملنا معادلات انحفاظ الطاقة وتدفق الحرارة كما اخترنا استخدام طريقة الفروق المنتهية وخوارزمية غوص-صيدل. ان مقارنة النتائج المتحصل عليها مع نتائج منشورة سابقا أظهرت تطابقا مقبولا. بالإمكان استغلال هذه النتائج من أجل إيجاد سرعة التبريد و سرعة التسخين.

**الكلمات المفتاحية :**

التلحيم , الليزر , إنحفاظ الطاقة , طريقة الفروق المنتهية , تغير الطور , التدفق , الانصهار , سرعة التبريد.

**Study of laser welding in fusion temperature limits****Summary:**

Laser welding is widely used in industry and materials processing. In our work we used a CO<sub>2</sub> laser in both cases fixed and mobile for welding of two identical plates (TA6V). We propose a numerical model in the language FORTRAN to determine the distribution of heat on surface of the plate at every time. For this, we used the equations of conservation of energy and heat flow. For numerical resolution we have used the finite difference method and the algorithm of Gauss-Seidel. The state of the material passes through the solid and liquid phases. The comparison between the obtained results and previously published results show an acceptable agreement. We can use our results to find the cooling speed and heating speed.

**Keywords:**

Laser welding, Energy conservation, finite difference method, Phase Change, Flow, Fusion, cooling speed.