

No d'ordre :

No 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 : Physique des Rayonnements
Présenté par : **BENCHAA Sayhia**

Thème :

Répartition spatiale et temporelle d'énergie de sources lasers utilisées dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques

Soutenu publiquement

Le : 11 / 06 / 2017

Devant le jury composé de :

Pr. GHERIANI Rachid	Prof	Président	UKM Ouargla
Mme LEMKEDDEM Soumaya	MAA	Examineur	UKM Ouargla
Pr. KHELFAOUI Fethi	Prof	Rapporteur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2017/2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

L'esprit de mon père, la miséricorde de Dieu envers lui

Ma chère mère et mes frères Abd El Wahab et Koureichi.

Et mes sœurs Fatiha et Fatima.

Pour leur soutien et tous les efforts qui m'ont donné le long de mon parcours, et je

leur souhaite bonne santé et longue vie.

A tous mes amis.

A 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 donné la force et la patience.

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

Je tiens à remercier tout particulièrement Pr Rachid GHERIANI d'avoir accepté de présider ce jury et l'examinatrice Mme Soumaya LEMKEDDEM d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je la remercie également pour toutes les discussions et les orientations faites toute au long de 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, leurs 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 et à tout le personnel du laboratoire pour leurs encouragements en particulier : K. Telib, S. Guerrida, N. Khelef, F. Benatallah, N. Guessoum, K. Hamdoune, M. Siagh et Y. Bennana.

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

SOMMAIRE

Dédicace	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	01

Chapitre I : Généralités sur le soudage aux lasers et les sources de chaleur

I.1. Définition de soudage	03
I.2. Quelques généralités sur les procédés laser	03
I.2.1. Les rayonnements laser	03
I.2.2. Les différents types de laser	04
I.2.2.1. Les lasers CO ₂	05
I.2.2.2. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Granet)	05
I.3. Quelques notions sur les paramètres laser utilisés	05
I.3.1. La puissance moyenne et la puissance crête	05
I.3.2. Distribution temporelle de l'énergie	05
I.4. Le soudage par faisceau laser	06
I.4.1. Principe de soudage par faisceau laser	06
I.4.2. Paramètres du soudage par laser	07
I.5. Equations de conservations	07
I.5.1. Equation de conservation de la masse	07
I.5.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement	08
I.5.3. Equation de conservation de l'énergie	08
I.6. La source de chaleur Q	08
I.6.1. Définitions de source de chaleur (terme source)	08
I.6.2. Source de chaleur surfacique	09
I.6.3. Source de chaleur volumique	09
I.6.4. Le couplage de source volumique et surfacique	10

Chapitre II : Modélisation Numérique de l'équation de la chaleur

II.1. Définition du phénomène physique	12
II.2. Les hypothèse	13
II.3. Modèle mathématique	13
II.4. Modèle numérique	14
II.4.1. Méthode des Différences finies	14
II.4.2. Application de la Méthode des Différences Finies au point du Maillage	14
II.5. Traitement de changement de phase	16
II.6. Conditions initiales et conditions aux limites	16
II.7. Forme matricielle des équations différentielle	17
II.8. Les isothermes	18
II.8.1. Calcul des isothermes	18
II.9. Organigramme de calcul de température	19

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Conditions de l'opération	21
III.2. La répartition du terme source $Q(x, y, z)$	22
III.2.1. La répartition du terme source $Q(x, y, z)$ en fonction de x	22
III.3 : Profils de température	24
III.3.1 : Profils de température en fonctions de temps	24
III.3.2 : L'impact de la puissance sur la température suivant le temps	27
III.3.3 : Profils de température à l'axe x	29
III.3.4 : Profils de température à l'axe y	33
III.3.5 : Profils de température à l'axe z	35
III.4 : Calcul isothermes	39
III.5 : L'effet de la géométrie du terme source	41
Conclusion générale et perspectives	42
Références	43
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1	Le soudage	03
Figure I.2	Schéma de principe de fonctionnement d'un laser.	04
Figure I.3	Régime de fonctionnement impulsif.	06
Figure I.4	Paramètres du soudage par faisceau laser	07
Figure I.5	Forme de la source d'énergie	11
Figure II.1	Phénomène du soudage laser.	12
Figure II.2	Schéma pour la condition de $k=1$.	17
Figure II.3	Isotherme près de la surface ciblée a) mode conduction b) mode keyhole.	18
Figure II.4	Méthode de calcul de x_1 et z_1 des isothermes.	19
Figure II.5	Organigramme pour le calcul.	20
Figure III.1	La répartition de terme source en fonction de x avec $y=0$, $z=0$.	22
Figure III.2	Profils de température en fonction de temps au centre de terme source où $t=0.00175$.	25
Figure III.3	Profils de température en fonction de temps au centre de terme source où $t=0.0035$.	25
Figure III.4	Profils de température en fonction de temps au centre de terme source où $t=0.007$.	26
Figure III.5	Variation de température en fonction du temps.	27
Figure III.6	Impact de la puissance sur la température pour $x=z=0m$, $y=y_s$, $t=0.0035s$.	28
Figure III.7	Variation de la température en fonction de la puissance.	29
Figure III.8	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et $z=0$ pour $P=300W$.	30
Figure III.9	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et $y=0$ pour $P=300W$.	30
Figure III.10	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et $z=0$ pour $P=600W$.	31
Figure III.11	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et $y=0$ pour $P=600 W$.	31

Figure III.12	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et $z=0$ pour $P=900W$.	32
Figure III.13	Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et $y=y_s$ d'z et $y=y_s$ pour $P=900 K$.	32
Figure III.14	Profils de température en fonction de y pour différentes valeurs de x et $z=0$ pour $P=300W$.	33
Figure III.15	Profils de température en fonction de y pour différent valeur de x et $z=0$ pour $P=600W$.	34
Figure III.16	Profils de température en fonction de y pour différent valeur de x et $z=0$ pour $P=900W$.	34
Figure III.17	Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et $y=y_s$ pour $P=300W$.	36
Figure III.18	Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et $x=0$ pour $P=300W$.	36
Figure III.19	Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et $y=y_s$ pour $P=600W$.	37
Figure III.20	profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et $x=0$ pour $P=600W$.	37
Figure III.21	Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et $y=y_s$ pour $P=900W$.	38
Figure III.22	profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et $x=0$ pour $P=900W$.	38
Figure III.23	Isothermes pour différentes valeurs de température.	40
Figure III.24	Approximation de la variation de l'isotherme $T(x_1, z_1)$ par une fonction gaussienne	41
Figure III.25	Effet de la géométrie du terme source.	42

Liste des tableaux

Tableau III-1	Propriétés physiques d’AZ91 utilisées dans les calculs	21
Tableau III-2	La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=0$.	23
Tableau III-3	La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=d/2$.	23
Tableau III-4	La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=d$.	24
Tableau III-5	La variation de température en fonction du temps	26
Tableau III-6	La variation de température en fonction de la puissance.	28
Tableau III-7	La variation de la température au centre de terme source $x=0m$, $y=y_s$ et $z=0m$.	33
Tableau III-8	La température en fonction de y et pour différentes valeurs de x et $z=0$.	35
Tableau III-9	Variation de température en fonction de la puissance et de x .	39
Tableau III-10	Les valeurs maximales pour différentes de températures.	40
Tableau III-11	L’effet de la géométrie de terme source.	42



Introduction générale

Introduction générale

Récemment et face à un besoin industriel, le développement des procédés de soudage pour l'assemblage des alliages légers, en l'occurrence ceux à base de magnésium, est devenu un domaine de recherche attractif. Les alliages à base de magnésium est un exemple ; ils présentent un domaine de recherche attractif. En effet, les alliages de magnésium sont des nouveaux alliages qui sont de plus en plus utilisés dans l'industrie des moyens de transport à cause d'un certain nombre de caractéristiques intéressantes notamment leur faible densité [1]. Parmi les procédés de soudage utilisés, il y'a le soudage par faisceau laser.

Le soudage par faisceau laser offre de faible déformation et d'excellentes propriétés mécaniques associées à la qualité d'aspect et aux faibles dimensions des cordons de soudure [2].

Le but de notre travail est l'étude de la modélisation de la distribution spatiale et temporelle du terme source (source laser) au cours de soudage de deux plaques métalliques identiques. Nous avons essayé de réaliser les objectifs suivants :

1. Etude bibliographique sur le procédé de soudure aux lasers.
2. Etude de type de terme source et la forme de sa répartition d'énergie.
3. Modalisation numérique du terme source.
4. Calcul de la distribution de la température dans une pièce métallique lors du soudage.
5. Calcul des isothermes lors ou après l'opération de soudage.

Le premier chapitre de ce mémoire est une présentation des notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage par laser. Nous présentons les différents types de terme source et l'équation de conservation d'énergie.

Le deuxième chapitre est une présentation de la modélisation numérique pour le calcul de la répartition spatio-temporelle du terme source et le calcul des isothermes relatives aux températures des matériaux. Nous avons choisi la méthode des différences finis 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 relatifs aux distributions de puissance du terme source, des distributions des températures des matériaux et le calcul des isothermes. Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :

*Généralités sur le soudage aux
lasers et le terme source*

Chapitre I : Généralités sur le soudage aux lasers et les sources de chaleur

I.1. Définition de soudage

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la cohésion métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents [3].

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimiques [4]. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure typique de l'alliage est composée de six zones principales [5].

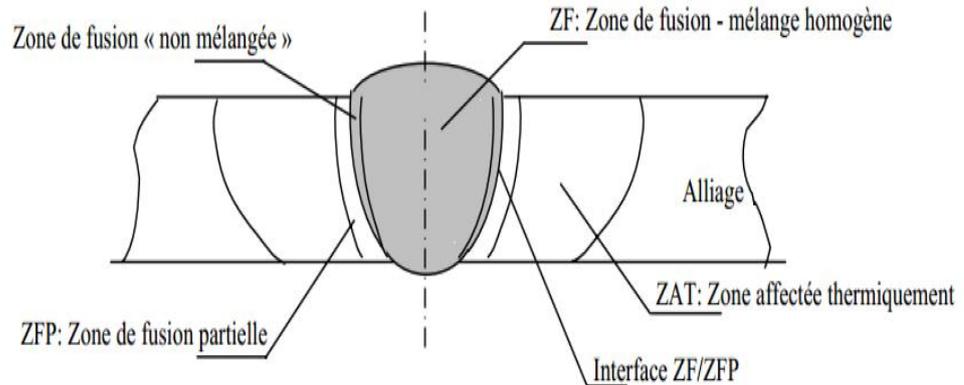


Figure I.1 : Le soudage [6].

I.2. Quelques généralités sur les procédés laser

I.2.1. Les rayonnements laser

En 1916, Albert Einstein définit les lois d'émission de photon (lumière) par stimulation et émet le principe de l'émission stimulée qui ouvre la porte à une nouvelle technologie :

LASER «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» soit en français l'amplification de lumière par émission stimulée de radiation.

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

Au début des années 70, la technologie laser prend place dans le milieu industriel dans le domaine des traitements des matériaux. Des outils de découpage des tôles par faisceau ont été utilisés pour la première fois en 1975 ; et c'est seulement en 1984 que la technologie laser a été développée pour le soudage des métaux dans les industries de production en série.

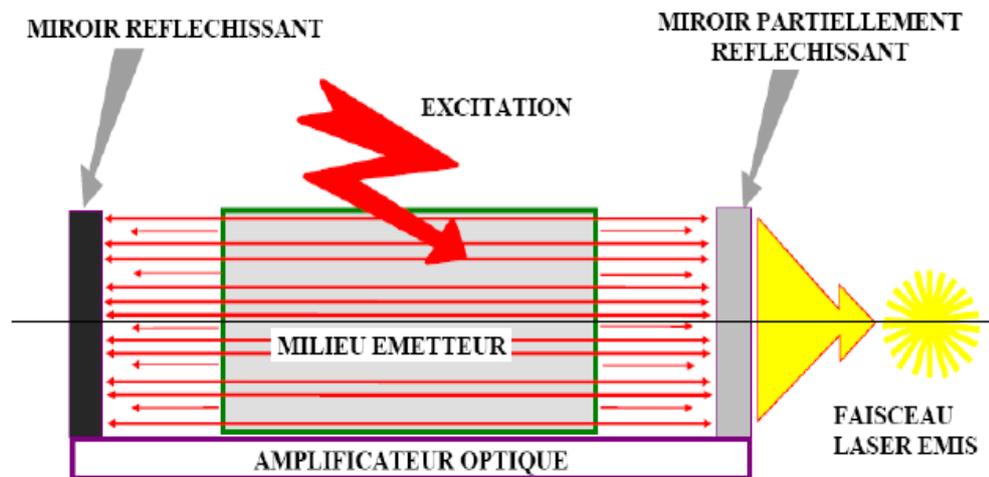


Figure I.2: Schéma de principe de fonctionnement d'un laser [7].

I.2.2. Les différents types de laser

Les lasers sont généralement classés en cinq familles selon la matière d'excitation : les lasers à solide, à gaz, à semi conducteurs, à liquide et à électrons libres. Il existe deux types de lasers industriels pour le soudage des métaux et des alliages. Ce sont les lasers CO₂ et les lasers YAG.

I.2.2.1. Les lasers CO₂

Ce sont les sources laser plus utilisées. Le milieu actif est constitué d'un mélange gazeux contenant de l'hélium (50%), de l'azote (40%) et du dioxyde de carbone (10%). Des décharges électriques excitent les molécules de CO₂ qui émettent un rayonnement d'une longueur d'onde 10,6 μm [8]. Son couplage avec les matériaux soit moins efficace que celui des lasers solides. Grâce à leur puissance de 0.1 à 25KW [9], ce rayonnement est transportable seulement par miroirs. En général ce procédé est utilisé en régime de fonctionnement continu malgré la possibilité de pulser le faisceau [8].

I.2.2.2. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Granet)

Ils sont des lasers solides dont le milieu actif, de nature cristalline, est un grenat d'aluminium yttrium (Y₃Al₅O₁₂) dopé à 10²⁰ ions trivalents néodyme (Nd³⁺). Le rayonnement a une longueur d'onde de 1.06μm. Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 KW. Malgré leur faible puissance, ils sont par excellence l'outil de microsoudure de précision. Il est possible de transporter le faisceau Nd-YAG par fibre optique sur plusieurs dizaines de mètres ; il est donc possible de souder suivant des trajectoires complexes à l'aide de robots de soudage [2].

I.3. Quelques notions sur les paramètres laser utilisés

Les procédés étudiés et présentés par la suite nécessitent la mise en œuvre de lasers, soit en mode continu, soit en mode pulsé. Il apparaît donc utile quelques définitions concernant :

- le mode pulsé ;
- La puissance moyenne et la puissance crête ;
- Distribution temporelle de l'énergie.

I.3.1. La puissance moyenne et la puissance crête

La puissance moyenne représente la moyenne temporelle de la puissance délivrée par le laser. La puissance crête est la puissance maximale délivrée durant la durée du pulse.

Cependant, lorsque la distribution temporelle n'est pas strictement un créneau, il faut considérer la moyenne réelle de la puissance durant une pulsation [10].

I.3.2. Distribution temporelle de l'énergie

La répartition spatiale de la puissance émise à chaque pulse peut être considérée comme étant une fonction créneaux, telle qu'elle est représentée sur la figure I.3 [10].

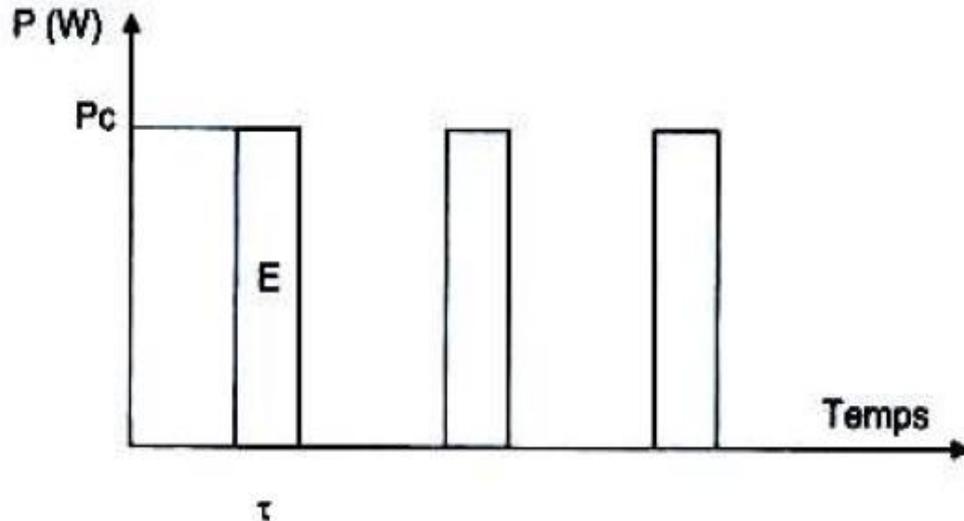


Figure I.3 : Régime de fonctionnement impulsionnel [11].

Pour le régime représenté sur la figure, les paramètres décrivant le régime pulsé sont définies par :

- La durée du pulse (en s) : τ
- L'énergie par pulse (en J) : E
- La fréquence des pulses (Hz) : F
- La puissance crête (W) : $P_c = E/\tau$
- La puissance moyenne (W) : $P_m = E.F$

Dans notre étude le pas de temps est plus grand que τ .

I.4. Le soudage par faisceau laser

I.4.1. Principe de soudage par faisceau laser

Le soudage par faisceau laser fait partie des procédés de soudage dits à haute énergie (densité de puissance entre 10^{10} et 10^{13} W/m² contre 5.10^8 W/m² pour les procédés de soudage à l'arc).

La source de chaleur est une énergie électromagnétique sous la forme de photons qui forment un faisceau de très haute intensité. Lorsque les photons entrent en collision avec la pièce à souder, leur énergie cinétique se transforme en chaleur. Ce qui engendre les phénomènes de fusion et de vaporisation (effet Keyhole). Cette vaporisation crée localement une dépression dans le métal en fusion, et les gradients de température introduisent des mouvements de convection qui entraînent le fluide vers l'arrière du bain. Ce sont ces deux phénomènes qui permettent de former une cavité appelée capillaire autour du faisceau, avec

des parois composées de métal liquide en fusion. Ce bain de fusion ainsi créé est entretenu puis déplacé entre les pièces à assembler [3].

I.4.2. Paramètres du soudage par laser

Les paramètres du soudage par laser sont les suivants :

- La puissance du rayon ;
- 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 [6].

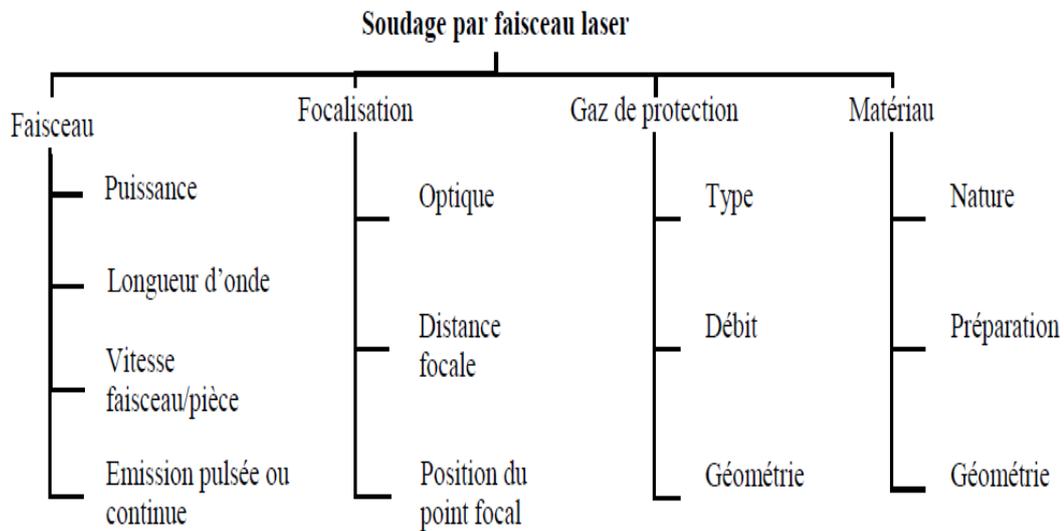


Figure I.4 : Paramètres du soudage par faisceau laser [6].

I.5. Equations de conservations

I.5.1. Equation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse d'un fluide compressible ou incompressible prend la forme suivante [12] :

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

Pour $\rho = \text{cte}$

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

Pour $\rho \neq \text{cte}$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{V} + \vec{V} \operatorname{grad} \rho = 0 \quad (3)$$

I.5.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement

Les équations de conservation de la quantité de mouvement ou équation de Navier-Stokes prennent la forme suivante [13] :

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

I.5.3. Equation de conservation de l'énergie

L'équation de l'énergie d'un fluide incompressible est la suivante [13] :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(i, j, k) \quad (5)$$

Cette équation est valable pour le traitement de l'état solide et liquide. Dans le cas de changement de phase nous appliquons une autre équation, le calcul du flux total d'énergie :

$$d\phi = \rho C_p \overline{\operatorname{grad}(T)} \cdot d\vec{S} + Q(x, y, z) \cdot dV \cdot dt \quad (6)$$

Avec :

C_p : Chaleur spécifique (J/kg K).

ρ : Densité volumique (kg /m³).

k : Conductivité thermique (W/m K).

$d\phi$: Flux de chaleur (J).

Q : Le terme source (W/m³).

dv : La volume élémentaire de pièce (m³).

dt : Le pas de temps (s).

I.6. La source de chaleur Q

I.6.1. Définitions de la source de chaleur (terme source)

La puissance laser crée une cavité qui consiste à une vapeur métallique sous l'effet de la distribution de la puissance (l'énergie) sur la pièce métallique. Les termes sources sont classés en deux catégories selon le mode de keyhole et la conduction [14].

Le mode de conduction est caractérisé par une puissance et une vitesse faible ; l'énergie s'évacue dans la pièce à souder à partir de la surface cible conférant à la source laser un caractère surfacique [14].

En mode keyhole, la puissance et la vitesse sont plus élevées et la chaleur diffuse dans la pièce à partir des parois du capillaire gazeux, Il se forme à l'intérieur de la pièce. Dans ce cas là, la source sera donc volumique [14].

I.6.2. Source de chaleur surfacique

Ce modèle de source est surtout utilisé pour l'étude numérique du soudage par conduction. La répartition de l'énergie est généralement une gaussienne (figure I.6.b).

$$Q(x, y) = \frac{P_a}{A} f(x, y) = qf(x, y) \quad (7)$$

Avec : $q(x, y)$ la densité de flux surfacique en W/m^2 , P_a la puissance absorbée, A constante équivalente à une surfacique en m^2 et $f(x, y)$ fonction de répartition surfacique de la source [1].

Nous pouvons citer quelques études sur les termes sources surfaciques, une première expression est [15] :

$$Q = \frac{2\eta P}{\pi r_1^2} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\pi r_1^2}\right) \quad (8)$$

En unité W/m^2 , le flux volumique (W/m^3) relatif au mode Keyhole peut s'exprimer par [16] :

$$Q = \frac{2\eta P}{\pi r_1^2 h} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\pi r_1^2}\right) \quad (9)$$

Dans ces deux expressions P représente la puissance du laser (W), η le rendement du procédé, le couple (x, y) représente les coordonnées dans le plan du point où est appliquée la source. Dans la seconde expression le terme h est la hauteur du capillaire gazeux.

r_1 : Le rayon de la tache laser focalisée (mm) [17].

$$r_1 = r_0 \left(1 + \frac{\lambda Z M}{\pi r_0^2}\right)$$

$$M = \frac{\pi D r_0}{2 F \lambda}$$

Où :

D est le diamètre non focalisé du faisceau à la lentille (mm), λ est la longueur d'onde du faisceau laser (mm), r_0 est le rayon du faisceau lorsque celui-ci est focalisé (mm) et F la longueur focale de la lentille (mm).

I.6.3. Source de chaleur volumique

Une source volumique $Q(x, y, z)$ modélise la contribution énergétique du bain de fusion. Dans ce cas la puissance absorbée est répartie en volume et la densité de puissance est distribuée dans un volume.

I.6.4. Le couplage de source volumique et surfacique:

Dans le cas du soudage par faisceau à haute énergie, l'énergie est déposée en profondeur dans la matière grâce à la création du keyhole. Une source volumique gaussienne à décroissance linéaire dans l'épaisseur est généralement utilisée (figure I.6. c) [1].

D'autres travaux et articles parlent de la répartition de la source de chaleur au cours de pièce métallique ; nous pouvons citer les articles suivants:

- Goldak et al. (1984) ont proposé une forme de deux demi ellipsoïdes qui prennent en compte le mouvement de la source (figure I.6.a) [18].

$$Q(x, y, z) = \frac{P_a}{B} f(x, y, z) = q_0 f(x, y, z) \quad (10)$$

Avec : $Q(x, y, z)$ la densité de flux volumique en W/m^3 , P_a la puissance absorbée, B constante équivalente à un volume en m^3 et $f(x, y, z)$ fonction de répartition volumique de la source.

$$f(x, y, z) = \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{d^2}\right) \quad (11)$$

- K. Abderrzak et al. (2009) ont étudié expérimentalement et par simulation numérique la répartition d'énergie dans une pièce à souder au laser. Ils ont utilisé un terme source volumétrique et un alliage de magnésium AZ91, avec un faisceau laser de Nd-YAG continu [19].
- S. Bonnour et al. (2012) ont étudié la distribution d'un terme source basé sur le modèle de Goldak's. Ils ont utilisé la méthode des volumes finis et ils ont comparé les résultats avec les résultats expérimentaux [20].

La figure I.5 représentée la forme de la répartition du terme source dans des différents cas de répartition surfacique ou répartition volumique.

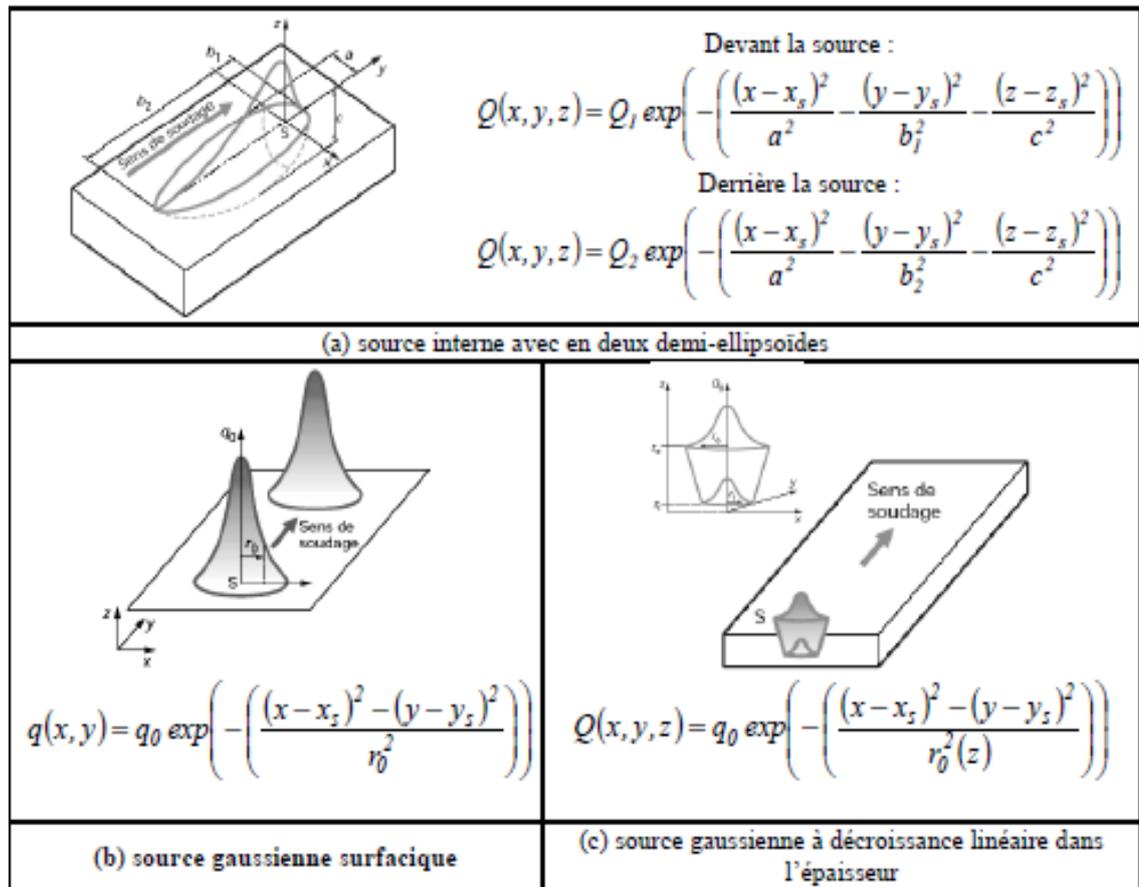
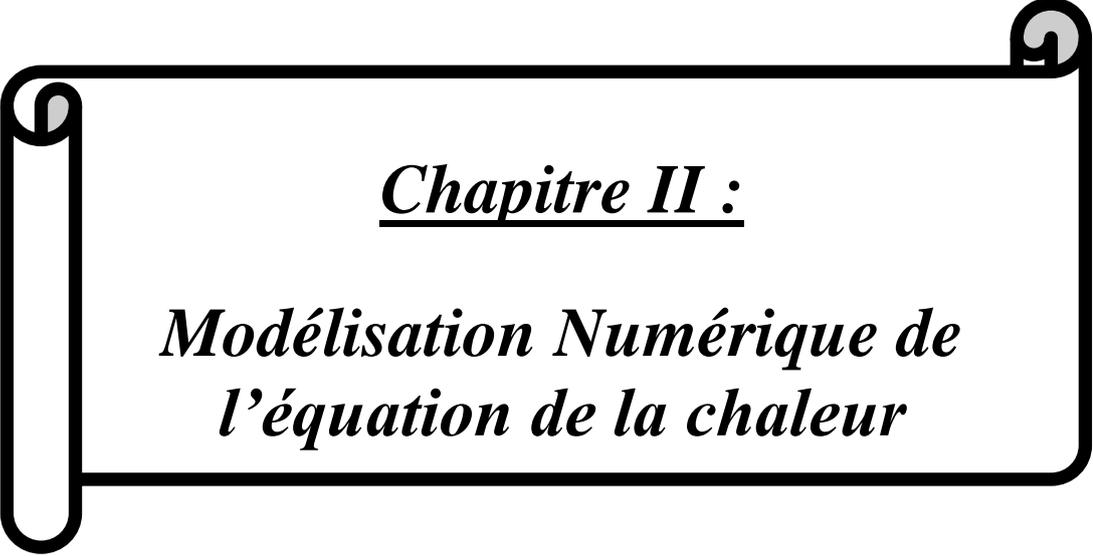


Figure I.5 : Forme de la source d'énergie [1].

Dans notre étude, nous nous intéressons à l'étude de la répartition spatiale et temporelle de l'énergie (terme source) dans une pièce sur la base des articles précédents et les données de l'article de K. Abderrazak et al. (2009) [19] et de l'article S. Bennour et al. (2012) [20].



Chapitre II :

*Modélisation Numérique de
l'équation de la chaleur*

Chapitre II :

Modélisation Numérique de l'équation de la chaleur

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation numérique utilisée, pour le calcul la répartition du terme source et la température dans une pièce à trois dimensions. Nous utilisons la Méthode des Différences Finies (MDF). Notre calcul est basé 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 des dérivées.

II.1. Définition du phénomène physique

Nous allons étudier la distribution de terme source (l'énergie) dans un procédé de soudage au laser. Nous négligeons la perte d'énergie par rayonnement et par convection. Il s'agit de la soudure de deux plaques métalliques identiques. Ce travail à réaliser est la distribution de la température au volume en fonction du temps dans les plaques de soudage avec un laser immobile. Le changement de phase est pris en compte dans l'étude.

Dans notre étude nous allons utiliser le terme source sous la forme de [20] :

$$Q(x, y, z) = \frac{3P}{abd \pi} \exp\left(-\frac{3(x(i))^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3(y(j))^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3(z(k))^2}{d^2}\right) \quad (1)$$

Avec :

a, b : Rayons focaux (m).

d : Pénétration maximale (m).

P : La puissance du laser (W).

Les phénomènes pouvant être considérés lors du soudage laser sont illustrés dans la figure II.1.

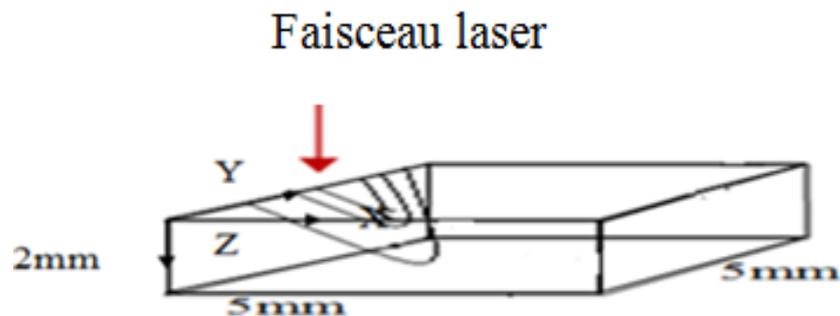


Figure II.1 : Phénomène du soudage laser.

II.2. Les hypothèses

Dans notre travail, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Nous négligeons les pertes de chaleur par rayonnement et par convection.
- Nous considérons que les propriétés physiques (capacité calorifique ou chaleur spécifique, conductivité thermique) sont constantes.
- Nous proposons un laser immobile avec une répartition volumique du terme source.
- Nous considérons le problème à trois dimensions.

II.3. Modèle Mathématique

Pour trouver la distribution de la chaleur dans le volume 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:

$$c p_s \rho_s \left(\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \right) = k_s \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(x, y, z) \quad (12)$$

Avec :

Cp_s : La chaleur spécifique (J/kg K).

ρ_s : La densité (W/m³).

k_s : Conductivité thermique (W/m K).

Pour le changement de phase solide - liquide, nous utilisons le flux de chaleur :

$$d\phi = \rho C_p \overline{\text{grad}(T)} \cdot d\vec{S} + Q(x, y, z) \cdot dV \cdot dt \quad (13)$$

Où :

$d\phi$: flux de chaleur(J).

$Q(x, y, z)$: terme source (W/m³).

dv : volume élémentaire de pièce (m³).

dt : pas de temps (s).

Dans le domaine occupé par la phase liquide (l), nous utilisons l'équation de la diffusion de la chaleur suivante:

$$\rho_l c p_l \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k_l \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(x, y, z) \quad (14)$$

Avec :

Cp_l : La chaleur spécifique (J/kg K).

ρ_1 : La densité (kg/m³).

k_1 : Conductivité thermique (W/m K).

Q (x, y, z) : Terme source (W/m³).

II.4. Modélisation numérique

II.4.1. Méthode des Différences Finies

La Méthode des Différences Finies (MDF) consiste à approximer les dérivées partielles d'une équation différentielle au moyen développement de Taylor. Ceci se déduit directement de la définition de la dérivée. Par l'utilisation de développement Taylor et au schéma des différences finies :

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

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

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T^{n+1}(i-1, j, k) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i+1, j, k)}{hx^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T^{n+1}(i, j-1, k) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i, j+1, k)}{hy^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T^{n+1}(i, j, k-1) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i, j, k+1)}{hz^2}$$

où ht est le pas du temps pour un indice n ; hx, hy et hz sont des pas de discrétisations suivant les coordonnées x, y et z avec les indices i, j et k respectivement.

II.4.2. 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 :

$$\rho_s C p_s \left[\frac{T^{n+1}(i, j, k) - T^n(i, j, k)}{ht} \right] = k_s \left[\frac{T^{n+1}(i-1, j, k) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i+1, j, k)}{hx^2} \right. \quad (15)$$

$$\left. + \frac{T^{n+1}(i, j-1, k) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i, j+1, k)}{hy^2} \right.$$

$$\left. + \frac{T^{n+1}(i, j, k-1) - 2 * T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i, j, k+1)}{hz^2} \right] + Q(x, y, z)$$

- Pour la phase liquide :

$$\rho_l C_{p_l} \frac{T^{n+1}(i,j,k) - T^n(i,j,k)}{ht} = k_l \left[\frac{T^{n+1}(i-1,j,k) - 2 * T^{n+1}(i,j,k) + T^{n+1}(i+1,j,k)}{hx^2} \right. \\ \left. + \frac{T^{n+1}(i,j-1,k) - 2 * T^{n+1}(i,j,k) + T^{n+1}(i,j+1,k)}{hy^2} \right. \\ \left. + \frac{T^{n+1}(i,j,k-1) - 2 * T^{n+1}(i,j,k) + T^{n+1}(i,j,k+1)}{hz^2} \right] + Q(x, y, z) \quad (16)$$

Nous obtenons l'équation suivant :

- Pour l'état solide :

$$-\alpha_{3s} T^n(i, j, k-1) + (2\alpha_{1s} + 2\alpha_{2s} + 2\alpha_{3s} + 1) T^n(i, j, k) - \alpha_{3s} T^n(i, j, k+1) = \beta_s(k) \quad (17)$$

Où les paramètres α_{1s} , α_{2s} , α_{3s} , α_{4s} , $\beta_s(k)$ sont :

$$\alpha_{1s} = \frac{k_s H t}{\rho C p_s (H x)^2}$$

$$\alpha_{2s} = \frac{k_s H t}{\rho C p_s (H y)^2}$$

$$\alpha_{3s} = \frac{k_s H t}{\rho C p_s (H z)^2}$$

$$\alpha_{4s} = \frac{k_s H t}{\rho C p_s}$$

$$\beta_s(k) = T^n(i, j, k) + \alpha_{1s}(T^{n+1}(i-1, j, k) + T^{n+1}(i+1, j, k)) + \alpha_{2s}(T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i, j+1, k)) \\ + \alpha_{4s} Q(x, y, z)$$

- Pour l'état liquide :

$$-\alpha_{3l} T^n(i, j, k-1) + (2\alpha_{1l} + 2\alpha_{2l} + 2\alpha_{3l} + 1) T^n(i, j, k) - \alpha_{3l} T^n(i, j, k+1) = \beta_l(k) \quad (18)$$

Où les paramètres α_1 , α_{2l} , α_{3l} , α_{4l} , $\beta_l(k)$ sont :

$$\alpha_{1l} = \frac{k_l H t}{\rho C p_l (H x)^2}$$

$$\alpha_{2l} = \frac{k_l H t}{\rho C p_l (H y)^2}$$

$$\alpha_{3l} = \frac{k_l H t}{\rho C p_l (H z)^2}$$

$$\alpha_{4l} = \frac{k_l H t}{\rho C p_l}$$

$$\beta_l(k) = T^n(i, j, k) + \alpha_{1l}(T^{n+1}(i-1, j, k) + T^{n+1}(i+1, j, k)) + \alpha_{2l}(T^{n+1}(i, j-1, k) + T^{n+1}(i, j+1, k)) \\ + \alpha_{4l} Q(x, y, z)$$

Ces équations (17) et (18) sont applicables pour les états $j=2, j_{\max}-1, i=2, i_{\max}-1$ et pour $k=2, k_{\max}-1$.

Ces équations présentent clairement la forme matricielle :

$$A(k, k-1).X_{k-1} + A(k, k).X_k + A(k, k+1).X_{k+1} = B_k \quad (19)$$

II.5. Traitement du changement de phase

Pour la transition de phase solide liquide, la température demeure pratiquement 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 :

$$d\phi = \rho C_p \overline{\text{grad}(T)}.d\vec{S} + Q(x, y, z).dV.dt \quad (20)$$

On pose le rapport r entre le flux de chaleur et l'enthalpie de fusion H_{\min} pour dv .

$$r = \frac{d\phi(i, j, k)}{H_{\min}}$$

$$H_{\min} = \rho H_0 h_x h_y h_z$$

H_0 : Enthalpie de fusion par unité de volume

ρ : La densité de la phase solide-liquide (kg/m^3).

Soient T_{f1} et T_{f2} les températures minimale et maximale de fusion de l'alliage respectivement.

Nous allons trouver les éléments de la matrice comme suite :

$$A(k, k-1)=0 ; A(k, k)=1 ; A(k, k+1)=0 ; B(k)=B_k$$

- Si $r < 1$: Variation linéaire entre T_{f1} et T_{f2} ; soit :

$$B(k) = T^{n-1}(i, j, k) + r*(T_{f2}-T_{f1})$$

- Si $r > 1$: Variation linéaire à partir de T_{f2} , après soustraction de l'enthalpie de fusion de l'élément dv ; soit :

$$B(k) = T_{f2} + (((r-1)/r)*(1/Cp2*Re2*h_x*h_y*(h_z/2))* d\phi(i, j, k))$$

II.6. Conditions initiales et conditions aux limites

Dans les différents cas précédents, nous appliquons les conditions initiales et les conditions aux limites.

Pour les conditions initiales nous proposons :

La température initiale est $T_0=300\text{K}$.

Soit : $T(i, j, k, t=0)=T_0$

Pour les conditions aux limites nous proposons :

- **1^{er} Cas** : Pour $x=0$ (ou $i=1$)

Nous allons appliquer la symétrie par rapport à l'axe Ox : $T(i=0, j, k)=T(i=2, j, k)$.

- 2^{ème} Cas : Pour $y=0$ (ou $j=1$)

$$\frac{\partial T(i,j,k,t)}{\partial y} \Big|_{y=1} = 0 \text{ où } T(i, 1, k, t) = T(i, 2, k, t)$$

- 3^{ème} Cas : Pour $z=0$ (ou $k=1$)

Nous avons appliqué la forme différentielle entre les deux points $k=1$ et $k=2$, le schéma II.2 montre la condition pour $k=1$.

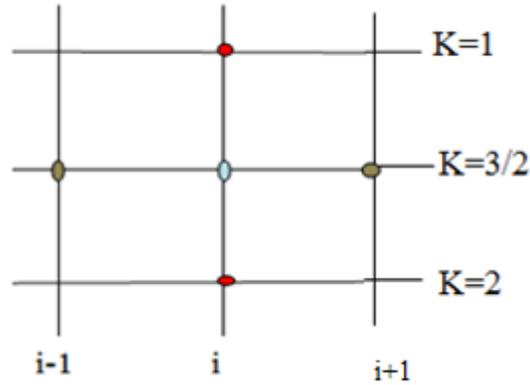


Figure II.2 : Schéma pour la condition de $k=1$.

- 4^{ème} Cas : Pour $x=x_{\max}$

$$\frac{\partial T(i,j,k,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_{\max}} = 0 \text{ où } T(i_{\max}-1, j, k, t) = T(i_{\max}, j, k, t)$$

- 5^{ème} Cas : Pour $y=y_{\max}$

$$\frac{\partial T(i,j,k,t)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max}} = 0 \text{ où } T(i, j_{\max}, k, t) = T(i, j_{\max}-1, k, t)$$

- 6^{ème} Cas : Pour $z=z_{\max}$

$$\frac{\partial T(i,j,k,t)}{\partial z} \Big|_{z=z_{\max}} = 0 \text{ où } T(i, j, k_{\max}, t) = T(i, j, k_{\max}-1, t)$$

II.7. Forme matricielle des équations différentielles

Comme nous avons noté, l'ensemble des équations pour le calcul de $T_{i,j,k}$ 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 $J_{\max}-1$ et pour $j=J_{\max}$:

-Pour $k = 1$: les termes non nuls $A_{1,1}$, $A_{1,2}$ et $B_{1,1}$;

-Pour $k=k_{\max}$: les termes non nuls $A_{k_{\max},k_{\max}} = 1$ et $B_{k_{\max}} = T_0$

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'équation matricielle ($A.X = B$) pour la résolution des températures $T^{n+1}(i, j, k)$. Nous appliquons la méthode itérative de Gauss-Seidel [21].

II.8. Les isothermes

Lors qu'on fait une soudure, la répartition thermique à l'intérieur de celle-ci (diffusion de la chaleur) s'effectue suivant des surfaces isothermes. Une Isotherme est une courbe dont tous les points ont la même température. La figure II.2 présente des formes d'isothermes.

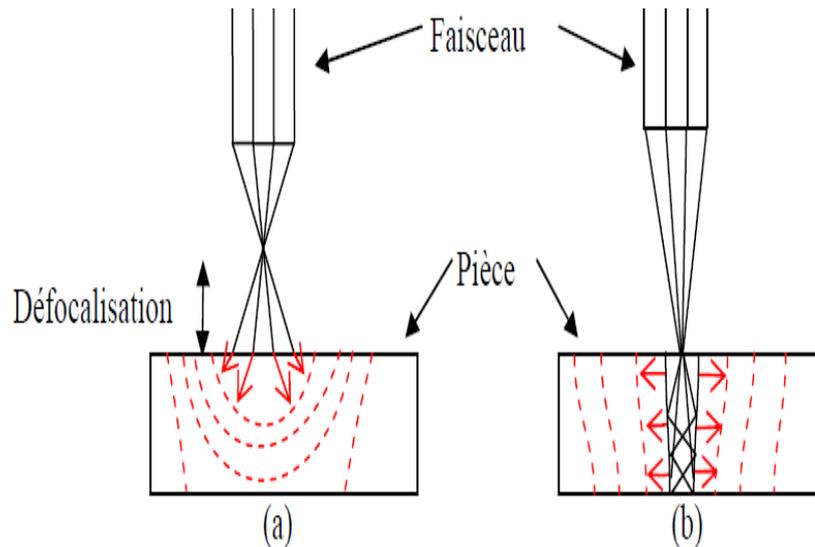


Figure II.3 : Isotherme près de la surface ciblée a) mode conduction b) mode keyhole [14].

II.8.1. Calcul des isothermes :

Pour trouver l'isotherme, nous avons pris un extrait du programme numérique de Mme GUERRIDA Saliha (travail en cours) [22].

Soient $T(i, j, k)$ les températures pour les coordonnées $x(i)$ et $z(k)$.

Soit T_1 la surface correspondant à l'isotherme (x_1, z_1) .

On opte pour une variation linéaire, pour $x_1=x(i)$ où i donné, la recherche de z_1 est telle que (entre $z(k)$ et $z(k+1)$) :

$$T(i, k) \leq T_1 < T(i, k+1)$$

$$\frac{z_1 - z(k)}{T_1 - T(k)} = \frac{z(k+1) - z(k)}{T(k+1) - T(k)} \quad (20)$$

$$z_1 = \frac{z(k+1) - z(k)}{T(k+1) - T(k)} + z(k) \quad (21)$$

La figure II.4 montre la méthode de calcul.

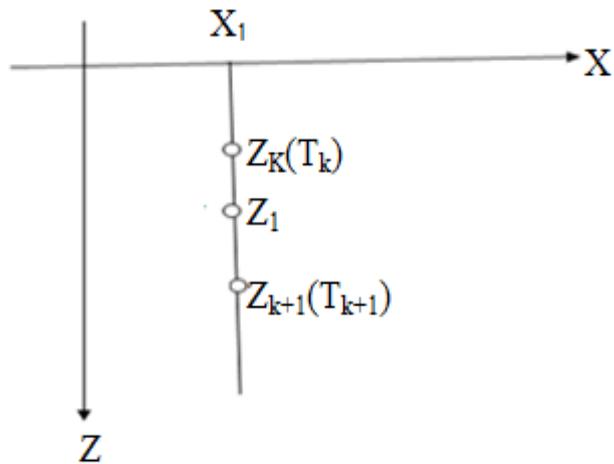


Figure II.4 : Méthode de calcul de x_1 et z_1 des isothermes.

II.9. Organigramme de calcul de température

La figure II.5 présente l'organigramme de calcul de la température $T_n(i,j,k)$ pour l'instant n et les positions d'indices (i, j, k) . T_{f1} et T_{f2} sont les températures de fusion.

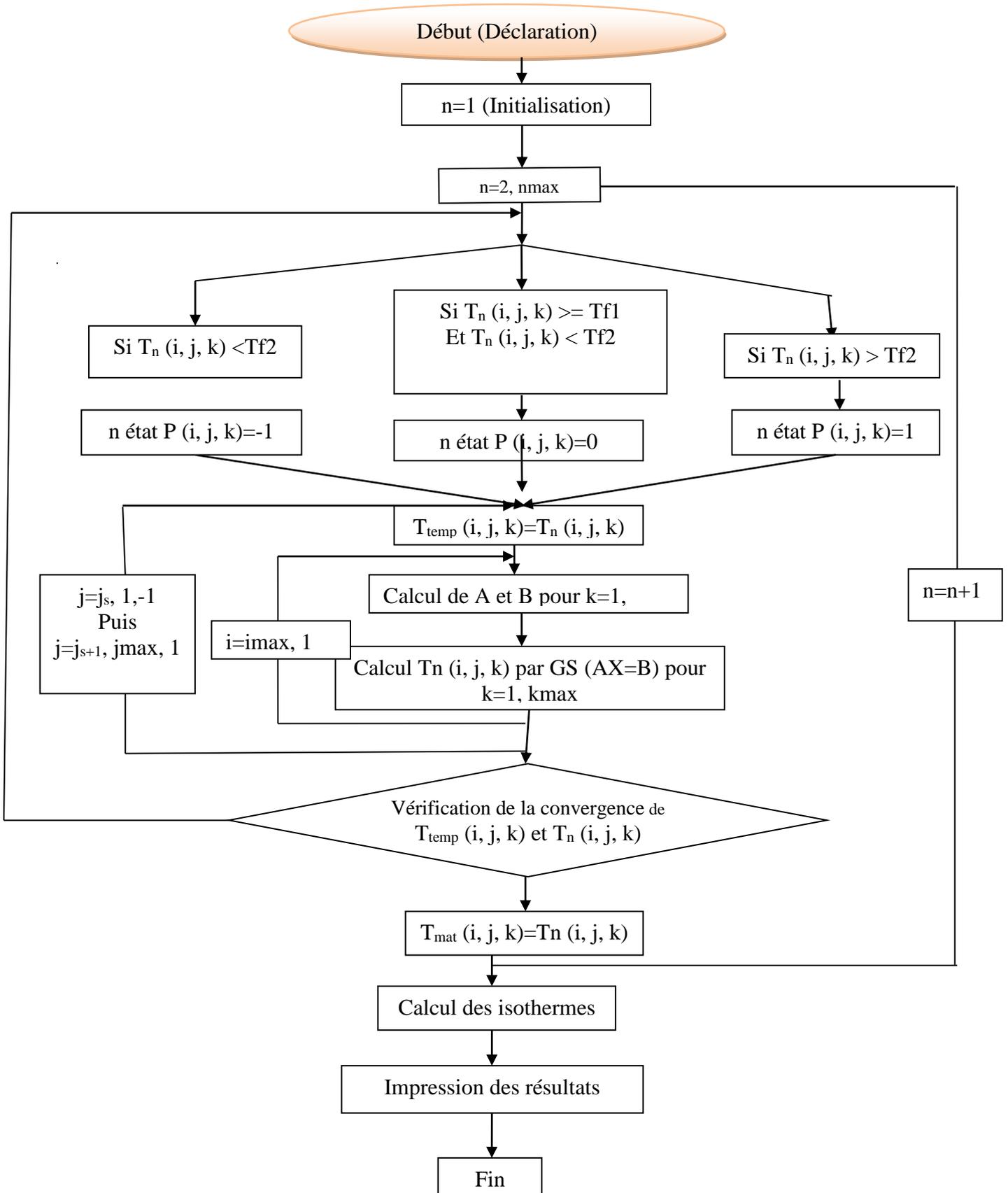
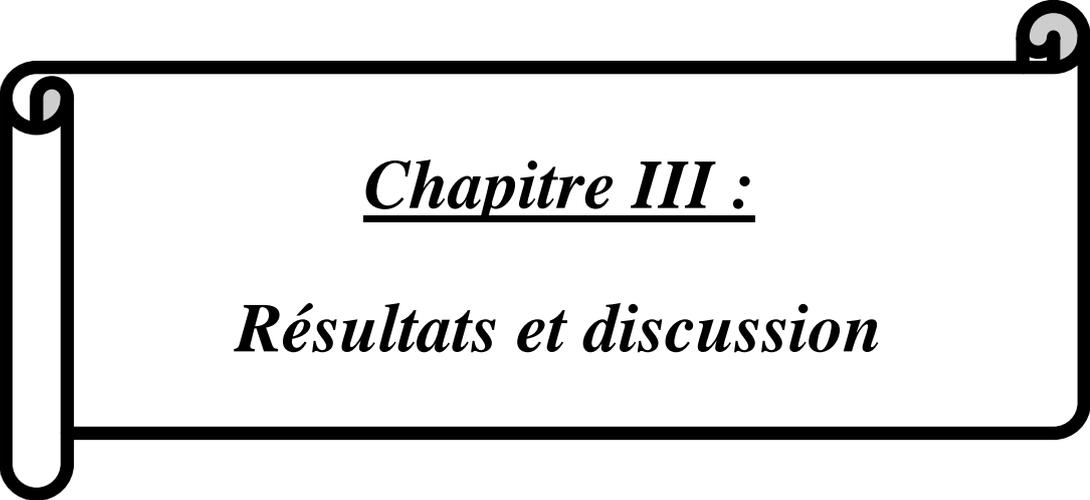


Figure II.5 : Organigramme pour le calcul



Chapitre III :

Résultats et discussion

Chapitre III :
Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats du modèle numérique pour l'étude de la répartition de terme source, la distribution de la température et le calcul des isothermes pour la soudure par faisceau laser Nd-YAG. Le faisceau laser fonctionne en mode continu ; il est considéré immobile lors de la soudure de deux pièces métalliques symétriques par rapport à l'axe X. Les deux pièces sont composées du même alliage.

III.1. Conditions de l'opération

L'alliage utilisé pour l'étude du soudage laser est de l'alliage de magnésium. Il s'agit d'un ternaire magnésium –aluminium- zinc et / ou manganèse de désignation AZ91 (85% magnésium, 10% Aluminium ; 3% zinc et 0.6% manganèse. Le tableau III.1 présente les données utilisées.

Tableau III.1. : Propriétés physiques d'AZ91 utilisées dans les calculs [20.21].

Grandeurs physiques (unité)	symbole	Valeur
Température de fusion de la phase solide (K)	T_s	740
Température de vaporisation de la phase liquide (K)	T_l	870
Densité (solide) (kg/m^3)	ρ_s	1810
Densité (liquide) (kg/m^3)	ρ_l	1590
La capacité calorifique (phase solide) ($\text{J}/(\text{kgK})$)	C_{p_s}	1020
La capacité calorifique (phase liquide) ($\text{J}/(\text{kgK})$)	C_{p_l}	1340
La conductivité thermique (phase solide) ($\text{W}/(\text{mK})$)	K_s	146
La conductivité thermique (phase liquide) ($\text{W}/(\text{mK})$)	K_l	156
Enthalpie de fusion (J/kg)	H	362

Les dimensions de la pièce étudiée sont : 5mm x 5mm x 2mm pour chaque plaque.
Pour les paramètres de soudage, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

- Longueur d'onde : 1.064μm.
- Puissance du laser : 600W.
- Longueurs relatives au faisceau laser : a=1mm, b=1mm, d=1mm

Dans notre travail, nous allons utiliser le terme source sous la forme [19] :

$$Q(x, y, z) = \frac{3P}{abd \pi} \exp\left(-\frac{3(x(i))^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3(y(j))^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3(z(k))^2}{d^2}\right) \quad (20)$$

Avec :

a, b : rayons focaux (m).

d : Pénétration maximale (m).

P : La puissance de laser (W).

i, j, k : indices relatifs au maillage utilisé.

III.2. La répartition du terme source Q(x, y, z)

Pour vérifier la validation de notre programme nous avons choisi de présenter quelques courbes issues de notre travail.

III.2.1. La répartition de terme source en fonction de X

Les calculs suivants présentent la distribution du terme source en fonction de x :

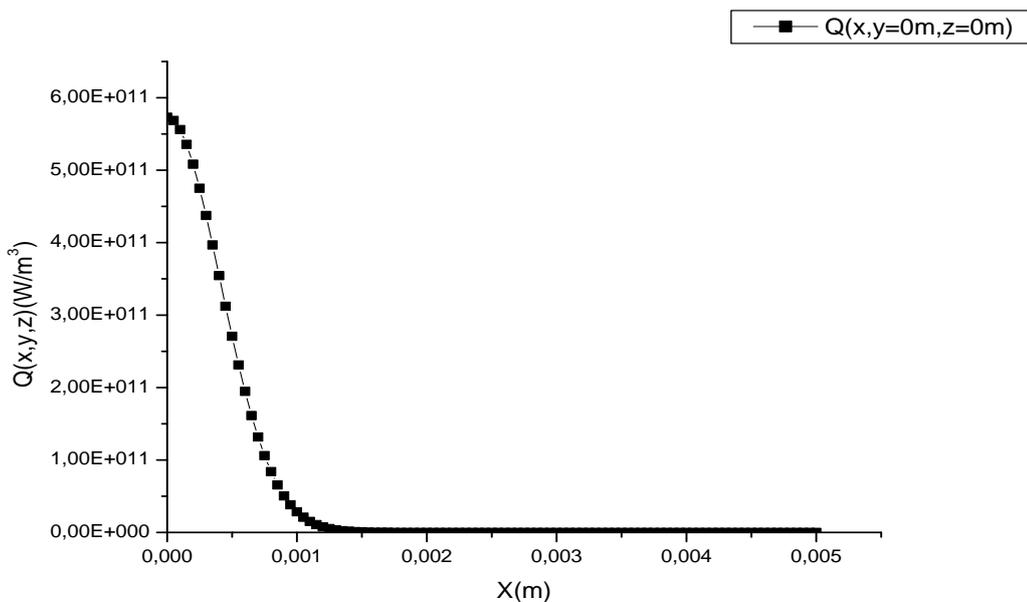


Figure III.1 : La répartition de terme source en fonction de x avec $y=0, z=0$.

Nous remarquons le terme source $Q(x, y, z)$ diminue avec l'augmentation de X . La valeur maximale est pour $x=0, y=0$ et $z=0$ (position du centre du faisceau laser). Le tableau III.2 montre la variation de terme source en fonction de x pour $x=y, z=0$.

Tableau III.2 : La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=0$.

$x, y(m)$	$Q(x, y, z=0)=A*Q_0(x, y, z)$
$a/4$	$Q(x=a/4, y=a/4, z=0)=0.687 Q_0(0, 0, 0)$
$a/2$	$Q(x=a/2, y=a/2, z=0)=0.223 Q_0(0, 0, 0)$
a	$Q(x=a, y=a, z=0)=0.0024 Q_0(0, 0, 0)$
$2a$	$Q(x=2a, y=2a, z=0)=0$

On remarque pour $x=y=a$, la densité de puissance laser est de 0,24% de la densité maximale ; elle est nulle pour $x=y=2a$.

Nous allons calculer la variation du terme source pour $x=y$ et $z=d/2$.

Tableau III.3 : La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=d/2$.

$x, y(m)$	$Q(x, y, z=0)=A*Q_0(x, y, z)$
$a/2$	$Q(x=a/2, y=a/2, z=d/2)= 0.1053Q_0(0, 0, 0)$
a	$Q(x=a, y=a, z=d/2)= 0.0005 Q_0(0, 0, 0)$
$2a$	$Q(x=2a, y=2a, z=d/2)=0$

Pour $x=y=a/2$ et pour $z=d/2$, la densité de puissance laser est de 10% de la densité maximale.

Tableau III.4 : La variation de terme source en fonction de x où $x=y$ et $z=d$.

$x, y(m)$	$Q(x, y, z=0)=A*Q_0(x, y, z)$
$a/2$	$Q(x=a/2, y=a/2, z=d)=0.011Q_0(0, 0, 0)$
a	$Q(x=a, y=a, z=d)=0.0012Q_0(0, 0, 0)$
$2a$	$Q(x=2a, y=2a, z=d)=0$

On remarque que pour d constante le terme source diminue avec l'augmentation de x .

On remarque que pour x constante le terme source diminue avec l'augmentation de z .

III.3. Profils de température

Pour trouver la température dans une pièce métallique. Nous avons choisi la direction à l'axe y . Nous choisissons le centre de faisceau laser à $y=y_s=y_{\text{laser}}=0.0025\text{m}$ et $x_s=z_s=0$.

La forme du terme source est :

$$Q(x, y, z) = \frac{3P}{abd\pi} \exp\left(-\frac{3(x(i))^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3(y(j)-y(j_s))^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3(z(k))^2}{d^2}\right) \quad (21)$$

III.3.1. Profils de température en fonction de temps

Nous avons trouvé quelques courbes de température au point $x=0\text{ m}$, $y=y_s=0.0025\text{ m}$ et $z_s=0$ (centre de terme source).

Pour la variation en fonction du temps, nous calculons la température en fonction de temps.

- $t_1=0.00175\text{s}$.
- $t_2=0.0035\text{s}$.
- $t_3=0.007\text{s}$.

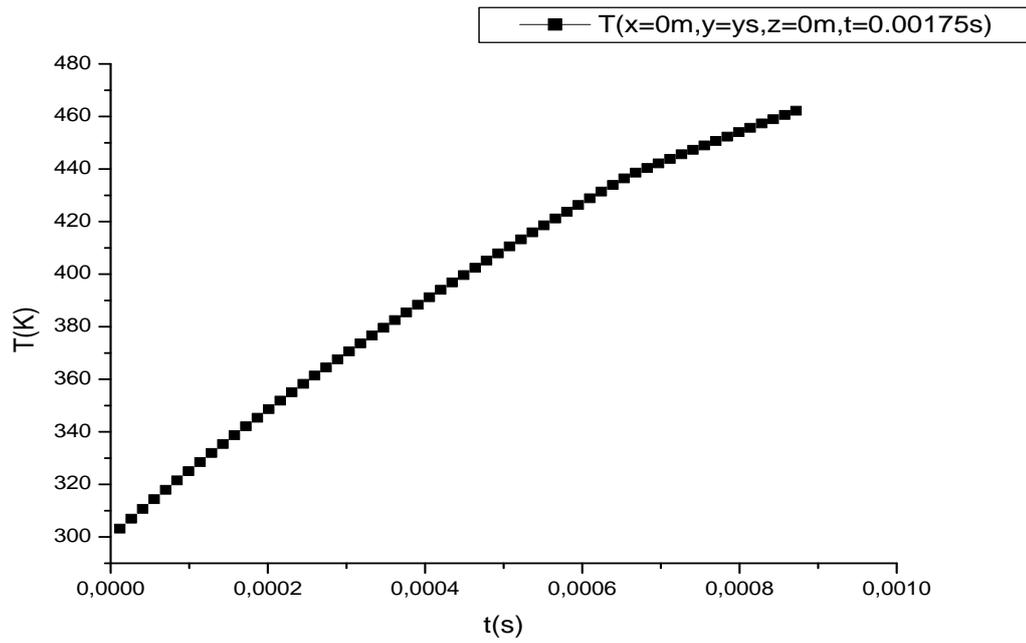


Figure III.2 : Profile de température en fonction de temps au centre de terme source.

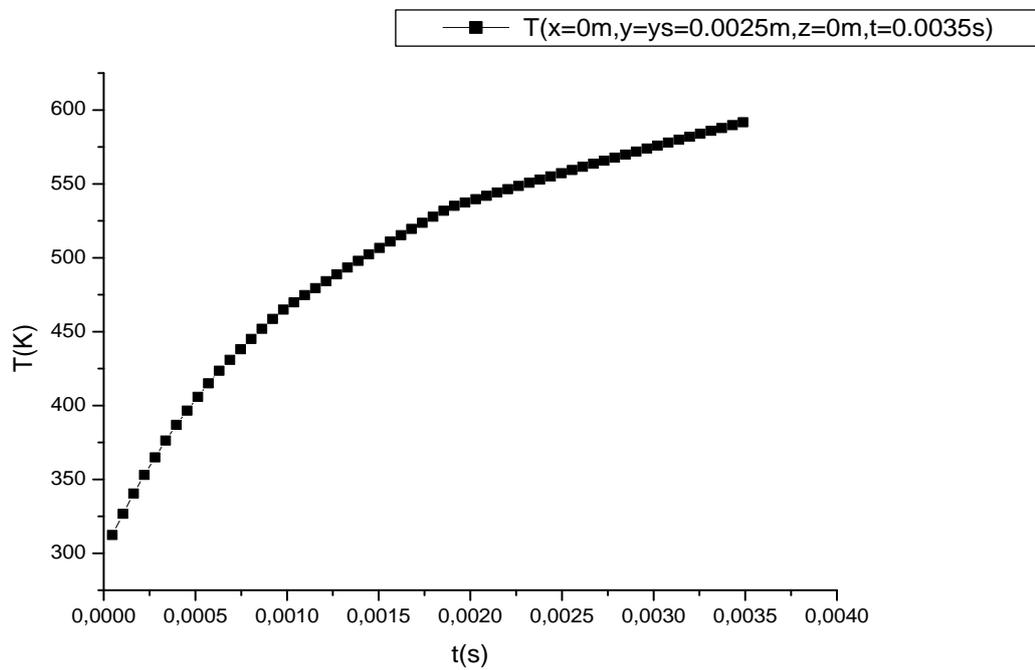


Figure III.3 : Profile de température en fonction de temps au centre de terme source.

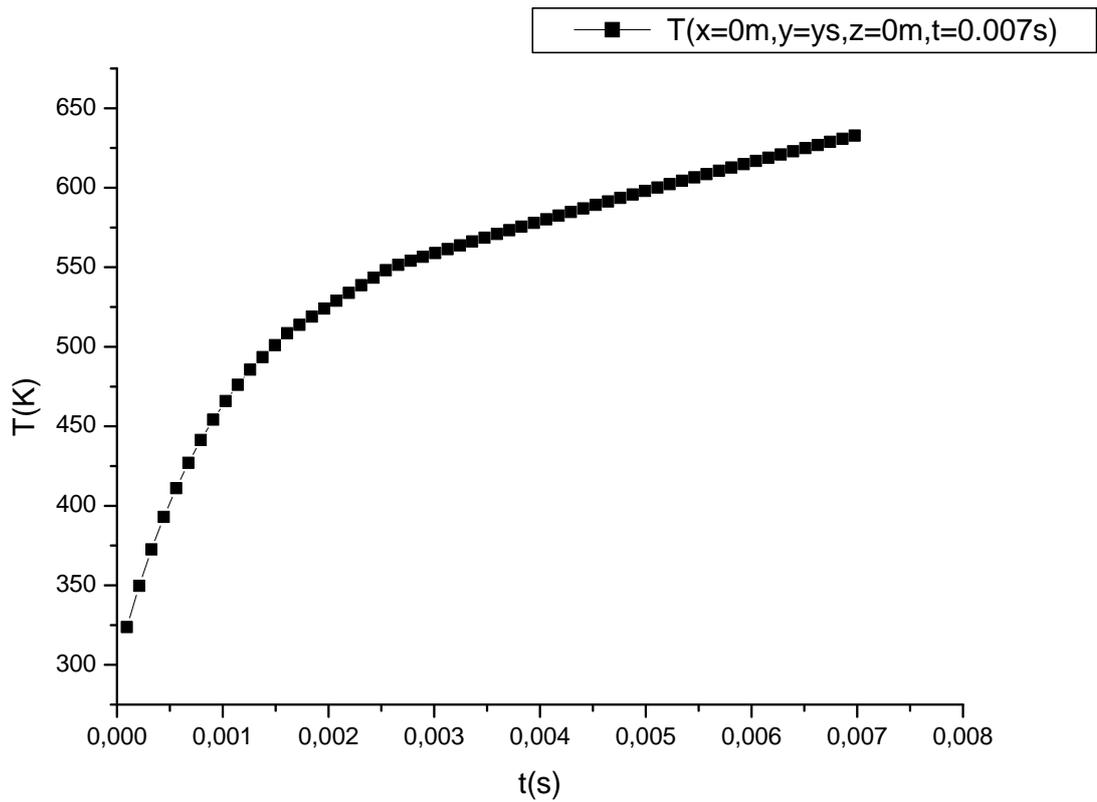


Figure III.4 : Profile de température en fonction de temps au centre de terme source.

Nous remarquerons la température augmentée avec l'augmentation du temps ; le tableau III.4 présente la température en fonction du temps.

Tableau III.5 : La variation de température en fonction du temps.

Le temps (s)	La température (K)
0.00175	462.21
0.0035	591.67
0.007	632.73

La figure III.5 montre la variation en fonction du temps

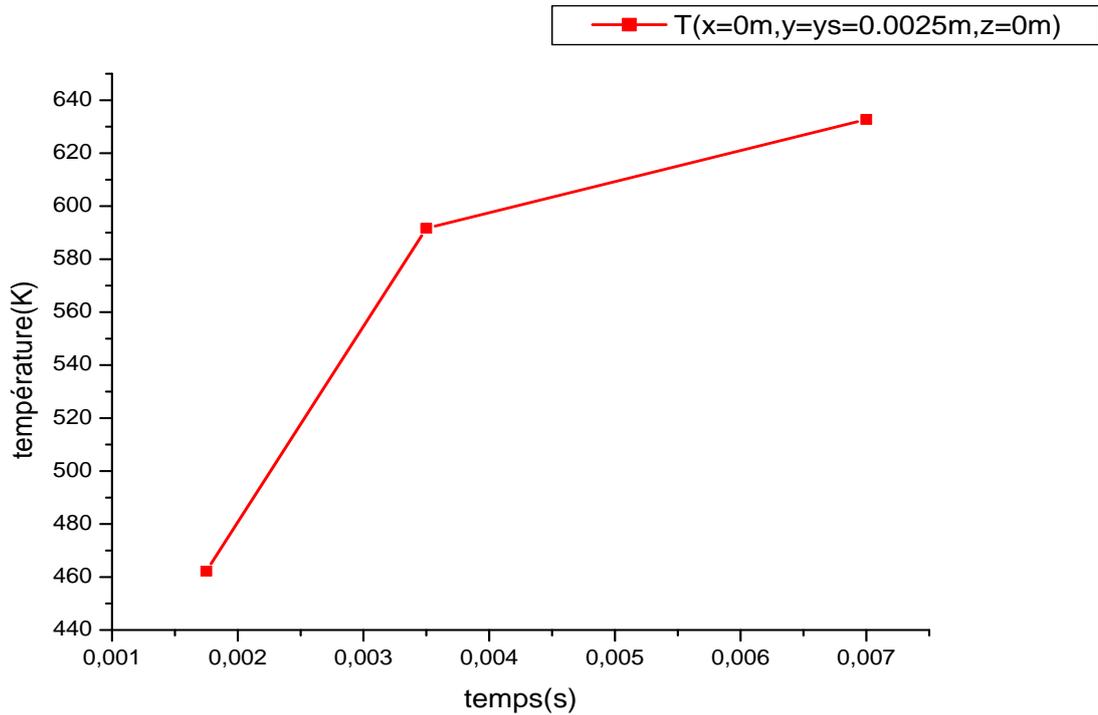


Figure III.5 : Variation de température en fonction du temps.

On remarque la variation de température en fonction de temps n'est pas linéaire.

III.3.2 : L'impact de la puissance sur la température suivant le temps

Nous allons choisir trois puissances pour trouver la température de centre de terme source ; la figure III.6 présente l'impact de la puissance sur la température pour des coordonnées x, y, z et un temps sont constants.

- Pour : $t=0.0035s, x=z=0m, y=0.0025m$.

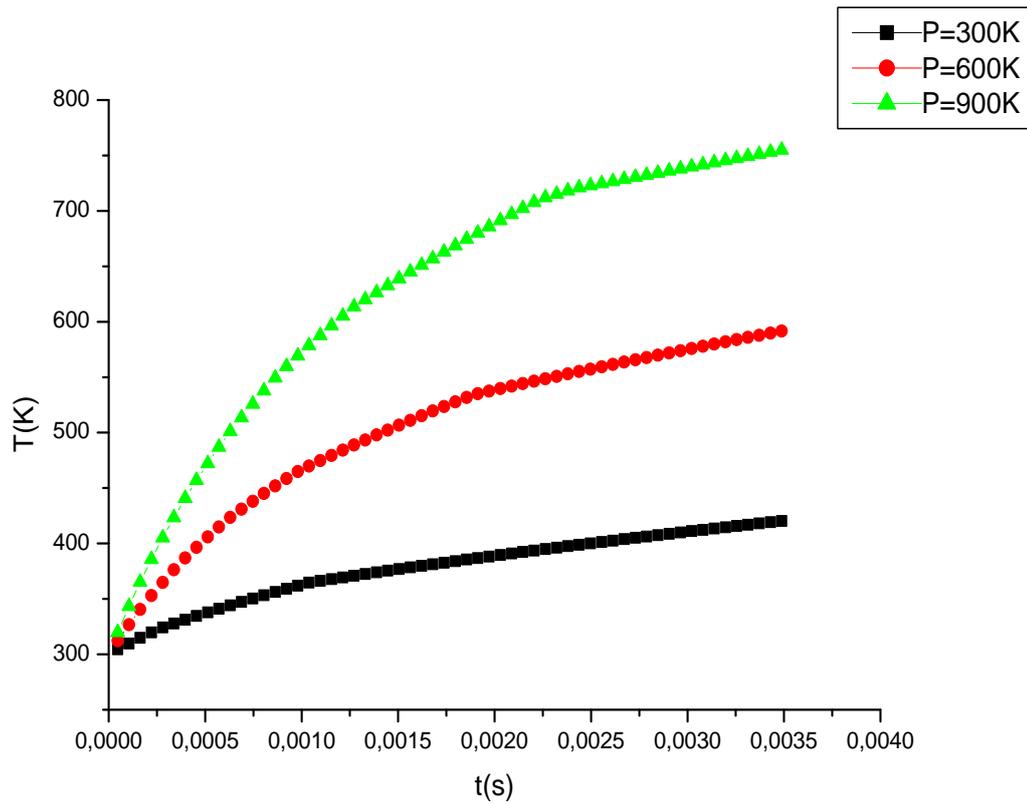


Figure III.6 : Impact de la puissance sur la température pour $x=z=0m$, $y=y_s$, $t=0.0035s$.

Nous remarquons que la température augmente avec l'augmentation de la puissance. Le tableau III.6 présente la variation de la température en fonction de la puissance.

Tableau III.6 : La variation de température en fonction de la puissance.

La puissance P (W)	La température (K)
300	480.34
600	591.68
900	760

La figure III.7 montre la variation de température en fonction de la puissance.

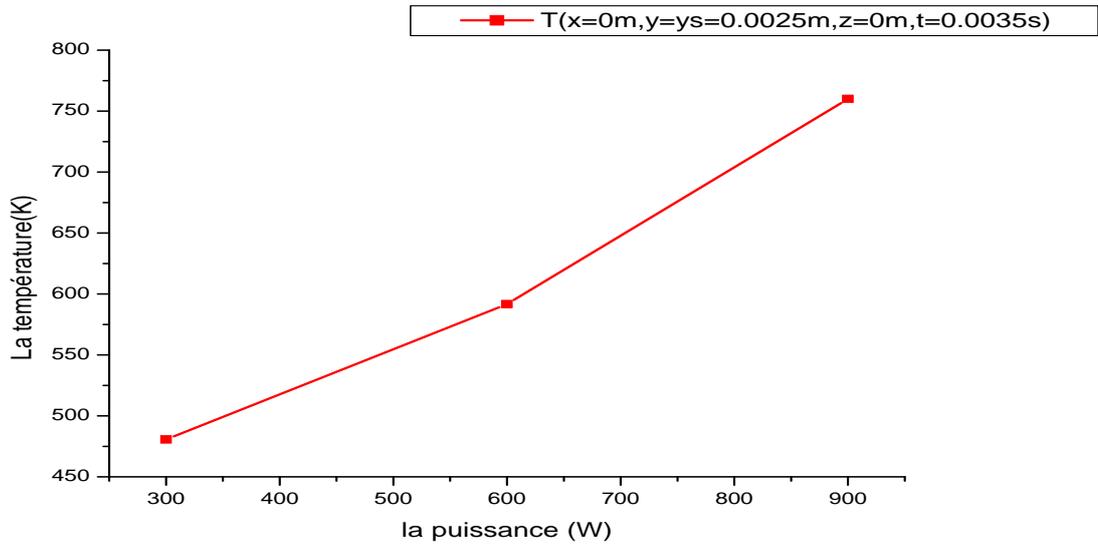


Figure III.7 : Variation de la température en fonction de la puissance.

On remarque la variation de température en fonction de puissance n'est pas linéaire.

III.3.3 : Profils de température à l'axe x :

- Pour $P=300W$.

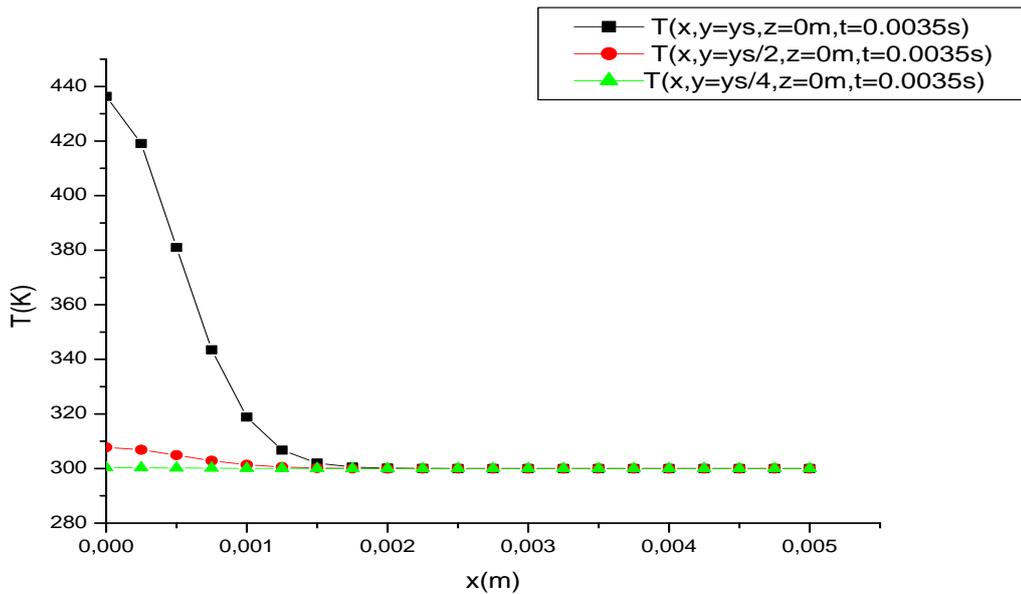


Figure III.8 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et $z=0$.

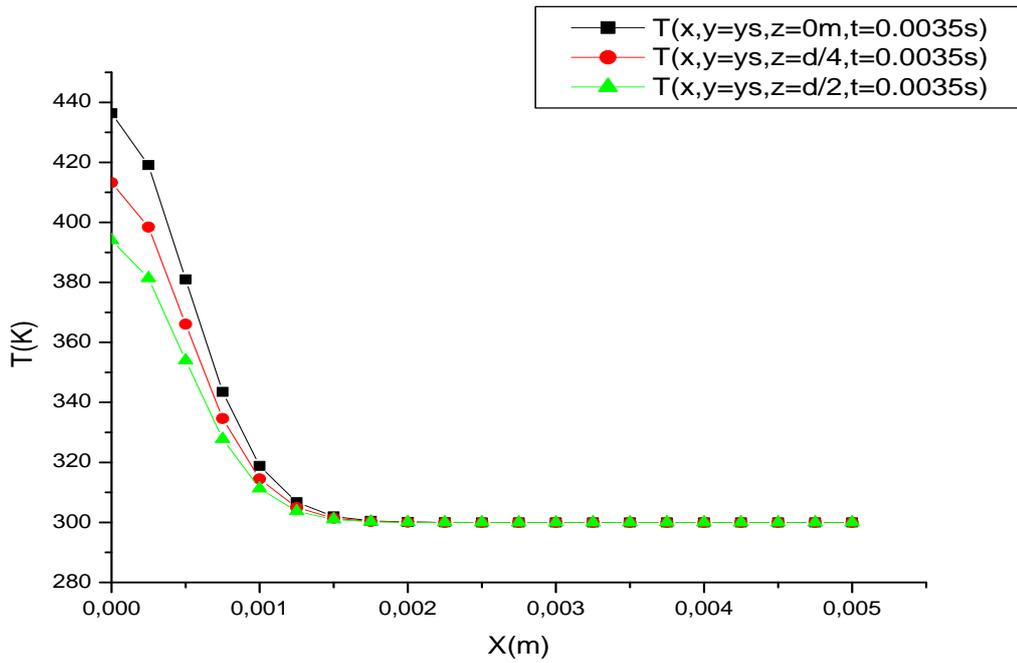


Figure III.9 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et y=0.

- Pour P=600W.

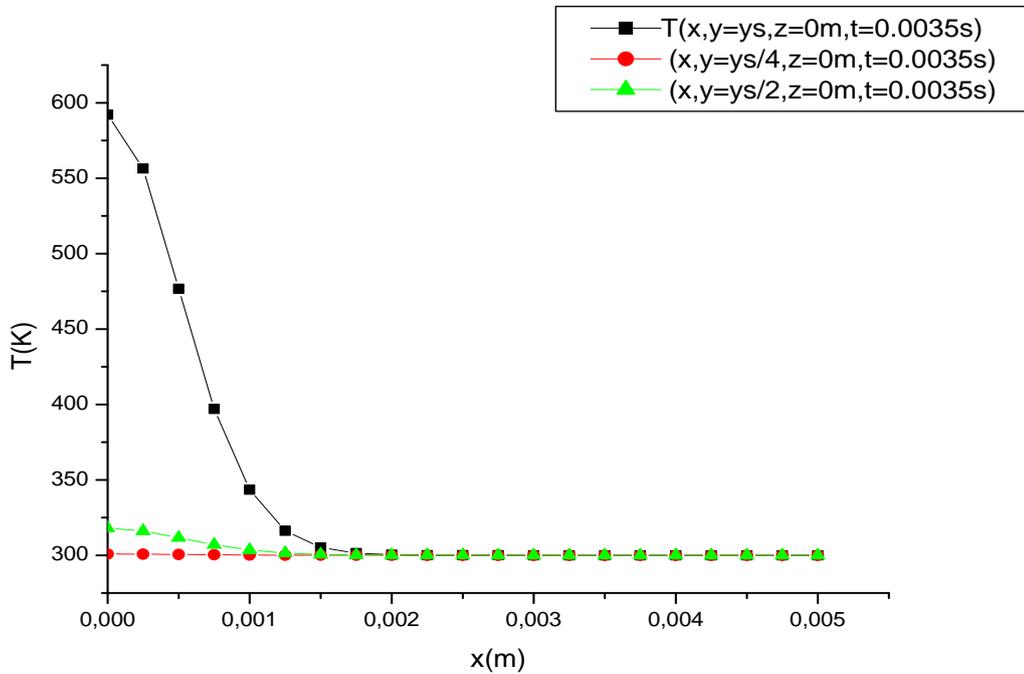


Figure III.10 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et z=0.

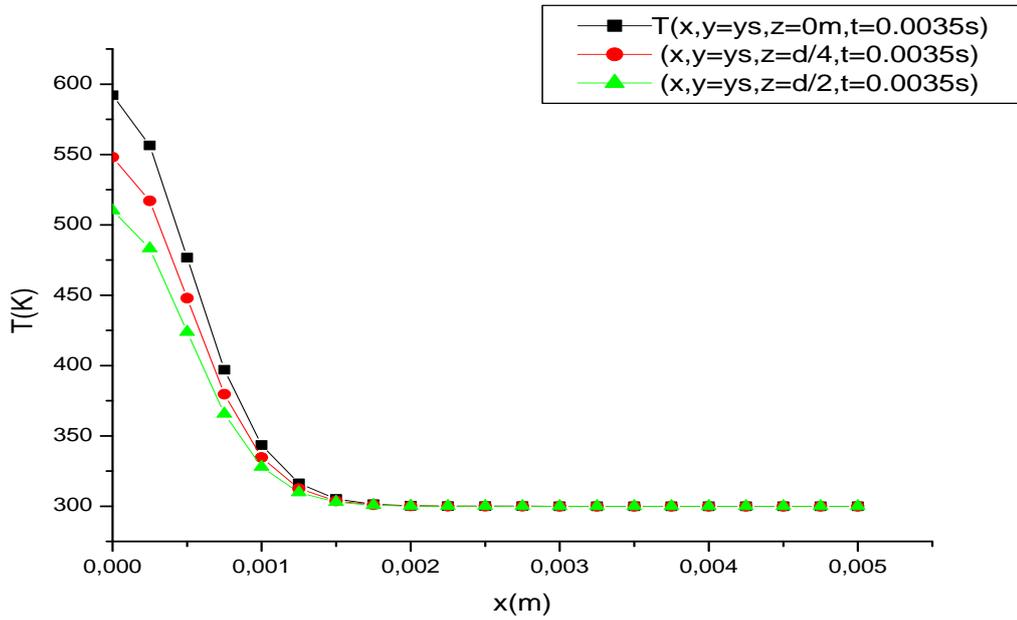


Figure III.11 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et y=0.

- Pour P=900W.

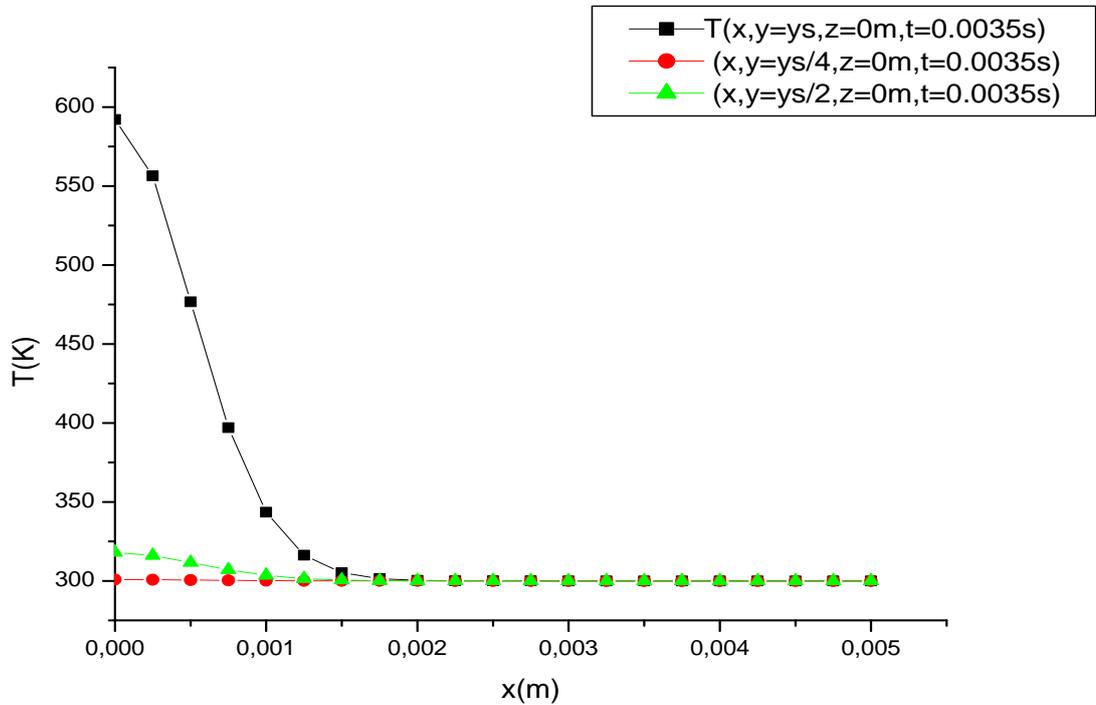


Figure III.12 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de y et z=0.

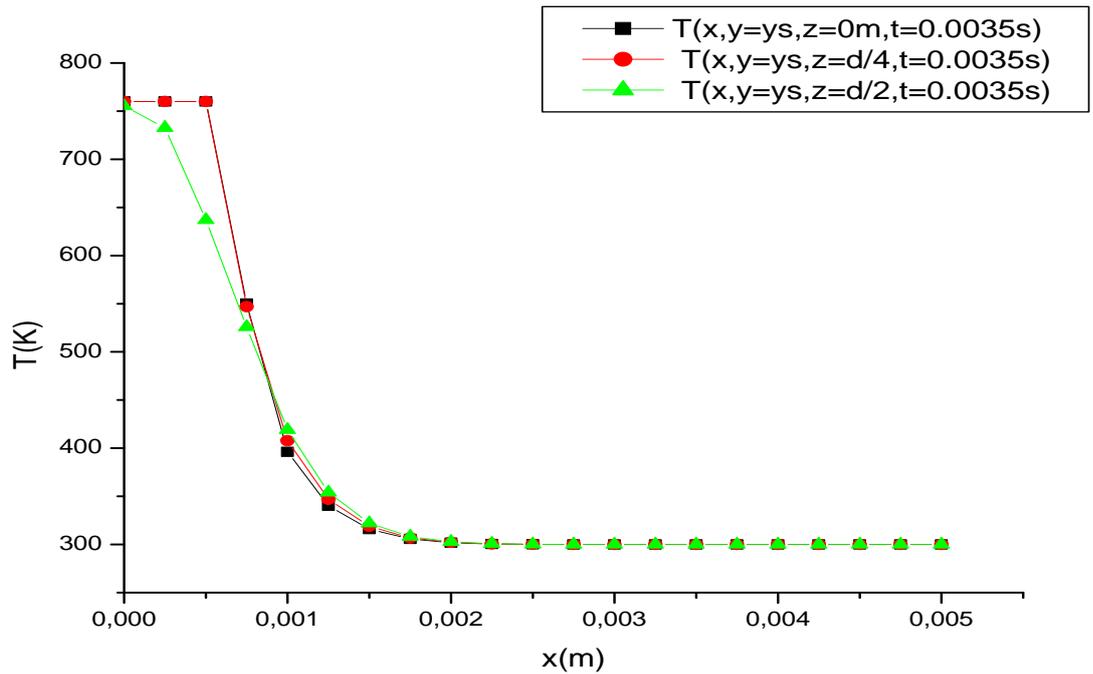


Figure III.13 : Profils de température en fonction de x pour différentes valeurs de z et $y=y_s$.

Nous remarquerons :

- La température augmente avec l'augmentation de la puissance de même valeur de x , y et z .
- La température diminue avec l'augmentation de x avec y et z sont constants.

Le tableau III.7 montre la variation de la température en fonction de la puissance lorsque $x=0m$, $y=y_s$ et $z=0m$.

Tableau.III.7 : La variation de la température au centre du terme source $x=0m$, $y=y_s$ et $z=0m$.

La puissance (W)	La température (K)
300	453.463
600	556.4345
900	760

III.3.4 : Profils de température suivant y :

- Pour $P=300W$.

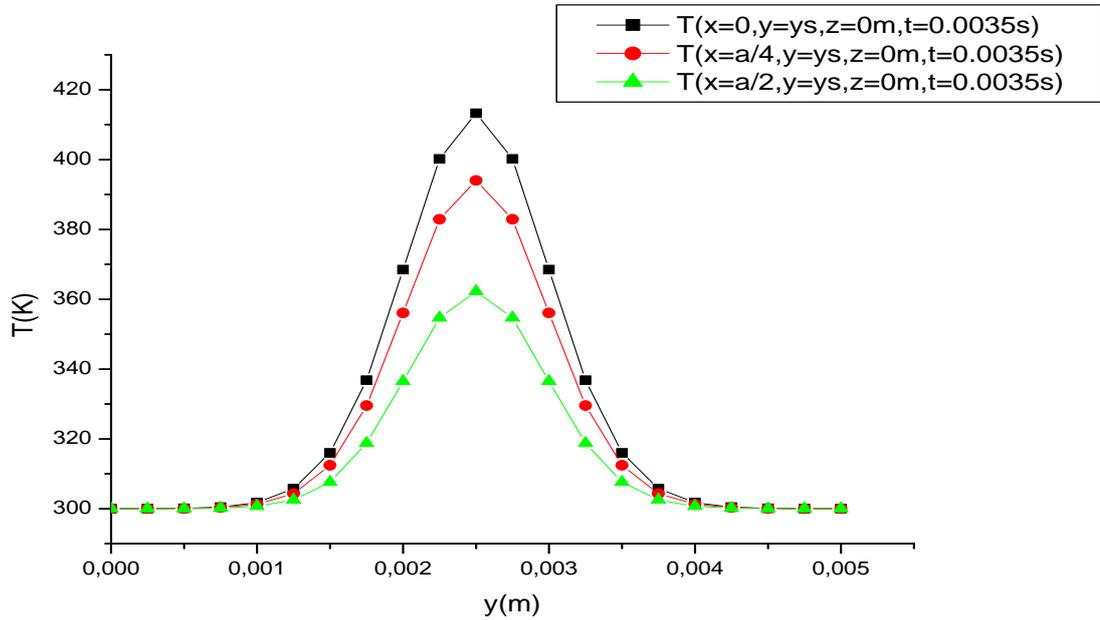


Figure III.14 : Profils de température en fonction de y pour différentes valeurs de x et $z=0$.

- Pour $P=600W$.

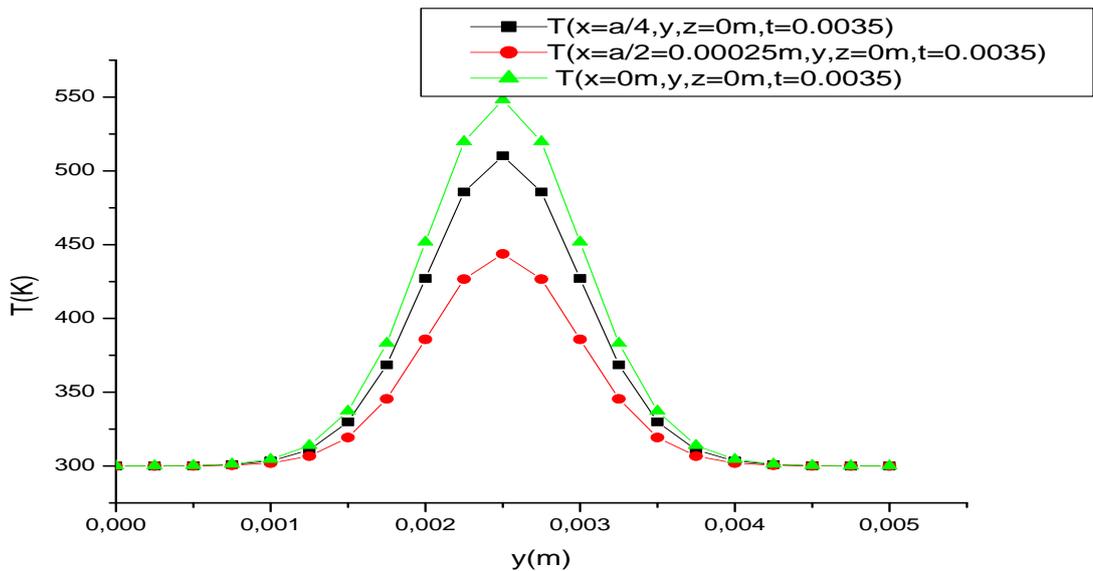


Figure III.15 : Profils de la température en fonction de y pour différentes valeurs de x et $z=0$.

- Pour $P=900W$.

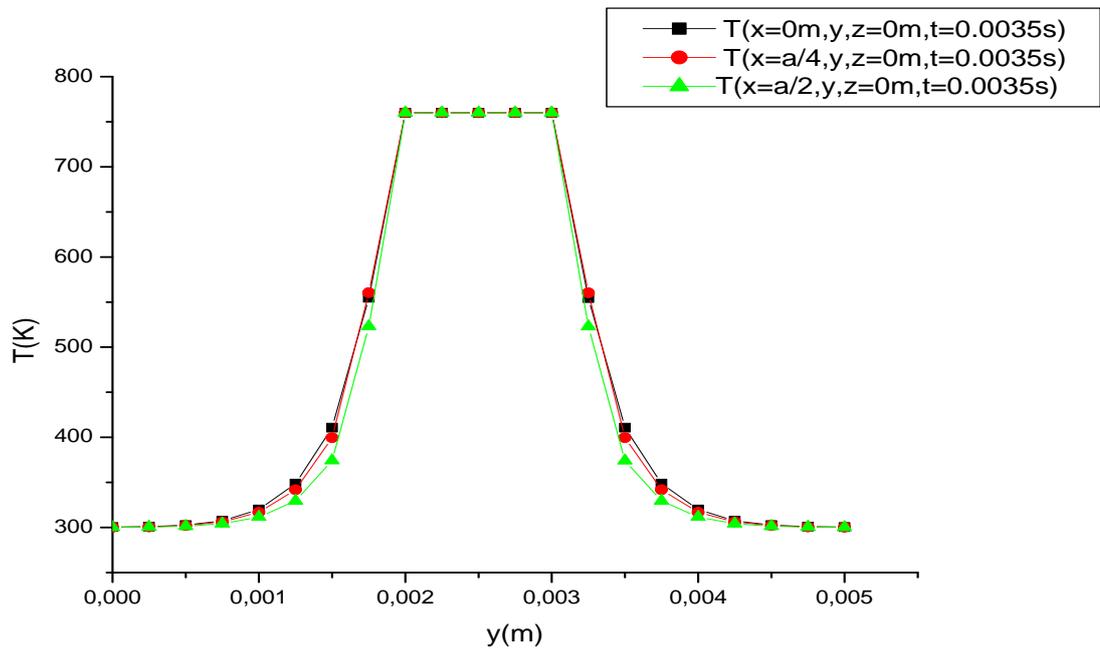


Figure III.16 : Profils de température en fonction de y pour différentes valeurs de x et $z=0$.

Nous remarquerons que la température dans le centre du terme source :

- Augmente avec l'augmentation de la puissance ;
- Diminue avec l'augmentation de x ;
- La valeur maximale est dans le centre du terme source.

Le tableau III.8 présente la variation de la température avec l'augmentation de x .

Tableau.III.8 : La température en fonction de y et pour différentes valeurs de x et $z=0$.

$x(m)$	La puissance (W)	La température (K)
0	300	413.25
	600	548.12
	900	760,00
a/4	300	394.01
	600	510.167
	900	760,00
a/2	300	362.22
	600	443.22

	900	760,00
--	-----	--------

III.3.5 : Profils de température à l'axe z :

- Pour P=300W.

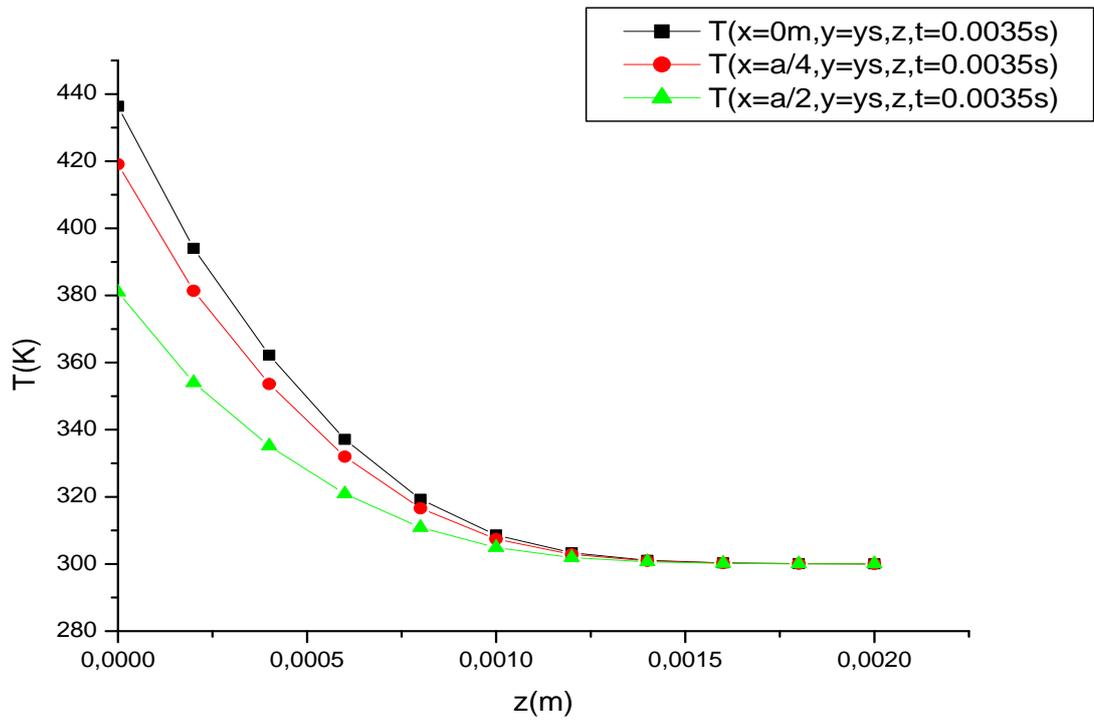


Figure III.17 : Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et y=y_s.

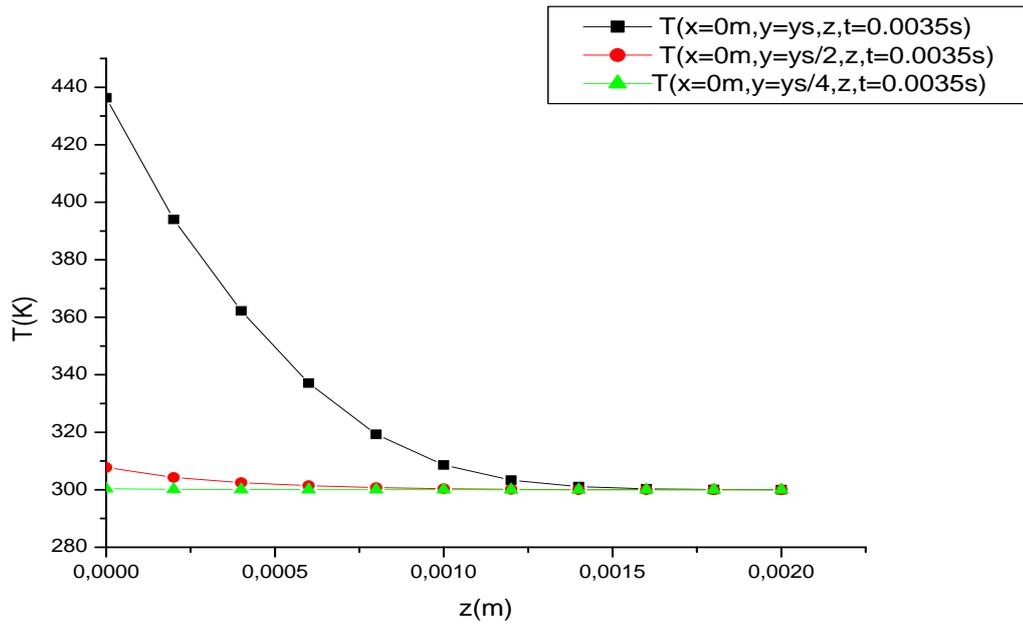


Figure III.18 : profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et $x=0$.

- Pour $P=600W$.

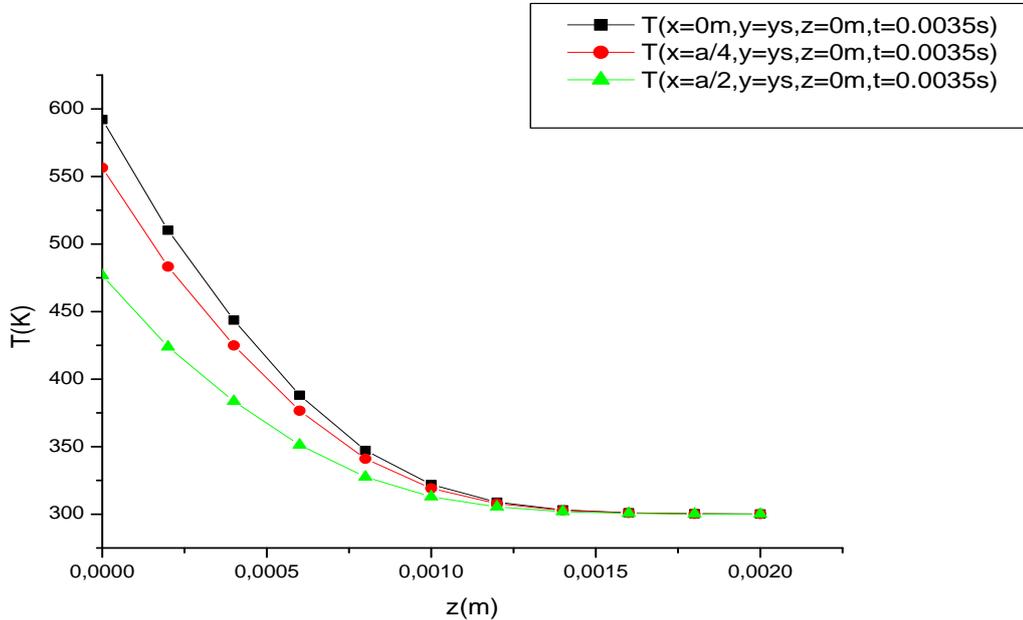


Figure III.19 : Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et $y=y_s$.

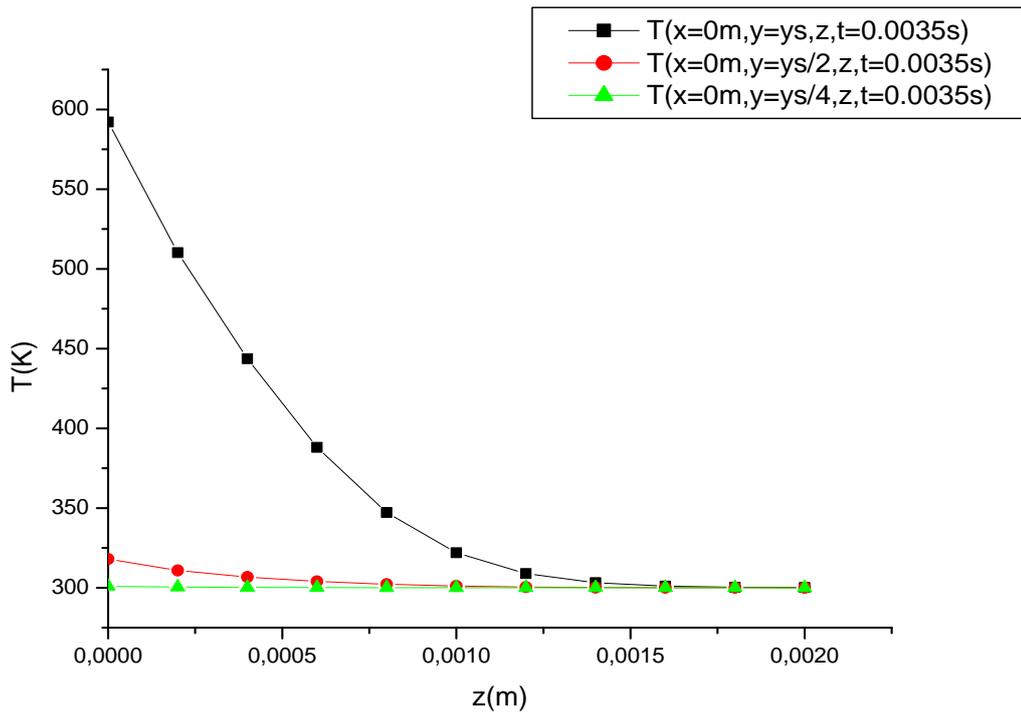


Figure III.20 : Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et x=0.

- Pour P=900W.

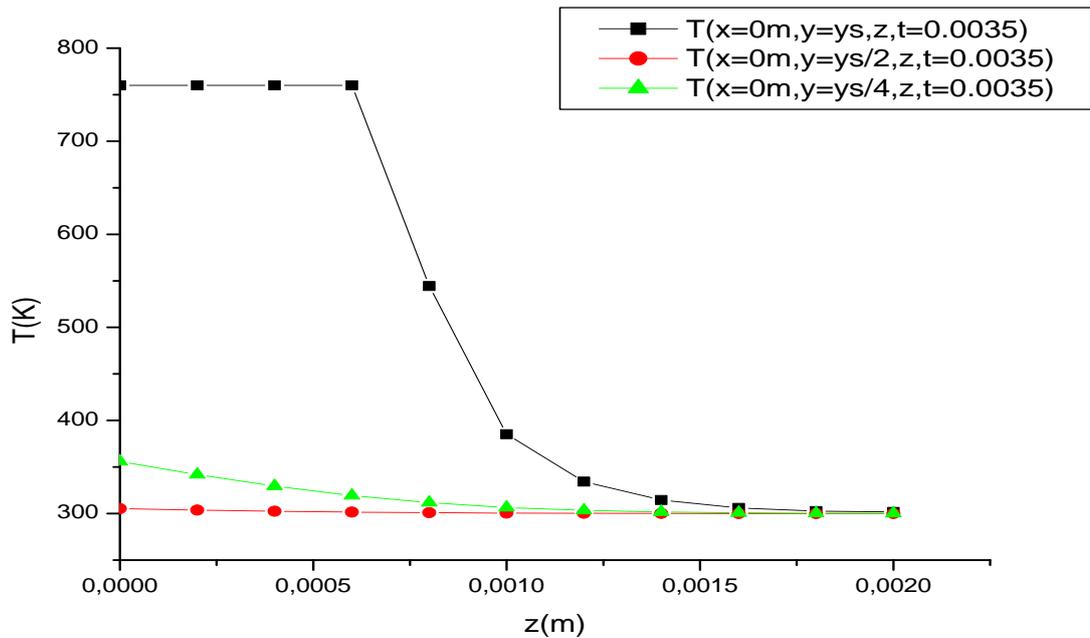


Figure III.21 : Profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de x et z=0.

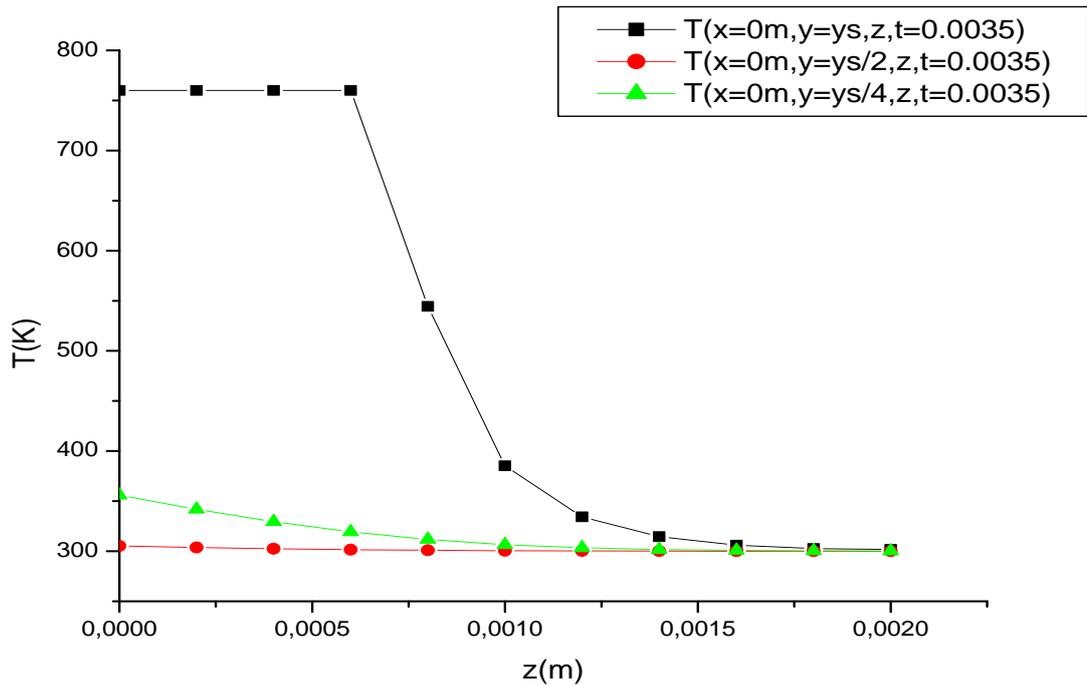


Figure III.22 : profils de température en fonction de z pour différentes valeurs de y et x=0.

Nous remarquons que la température :

- Augmente avec l'augmentation de puissance.
- Diminue avec l'augmentation de z et y.
- La valeur maximale est dans le centre du terme source.

Le tableau III.9 présente la température en fonction de la puissance avec différentes valeurs de x.

Le tableau III.9 : Variation de température en fonction de la puissance et de x.

x(m)	La puissance(W)	La température (K)
0	300	436.34
	600	592.05
	900	760,00
a/4	300	419.08
	600	556.43
	900	760,00
a/2	300	381.019

	600	476.71
	900	760,00

III.4 : Calcul des isothermes

Pour trouver les courbes des isothermes. Nous avons calculé les isothermes pour différentes valeurs de températures et pour une puissance constante $P=600W$.

Nous allons tracer les courbes des isothermes calculées pour différentes valeurs de températures $T_1=400K$, $T_2=450K$, $T_3=500K$, $T_4=550K$.

Le tableau III.10 présente les valeurs maximales pour différentes de températures.

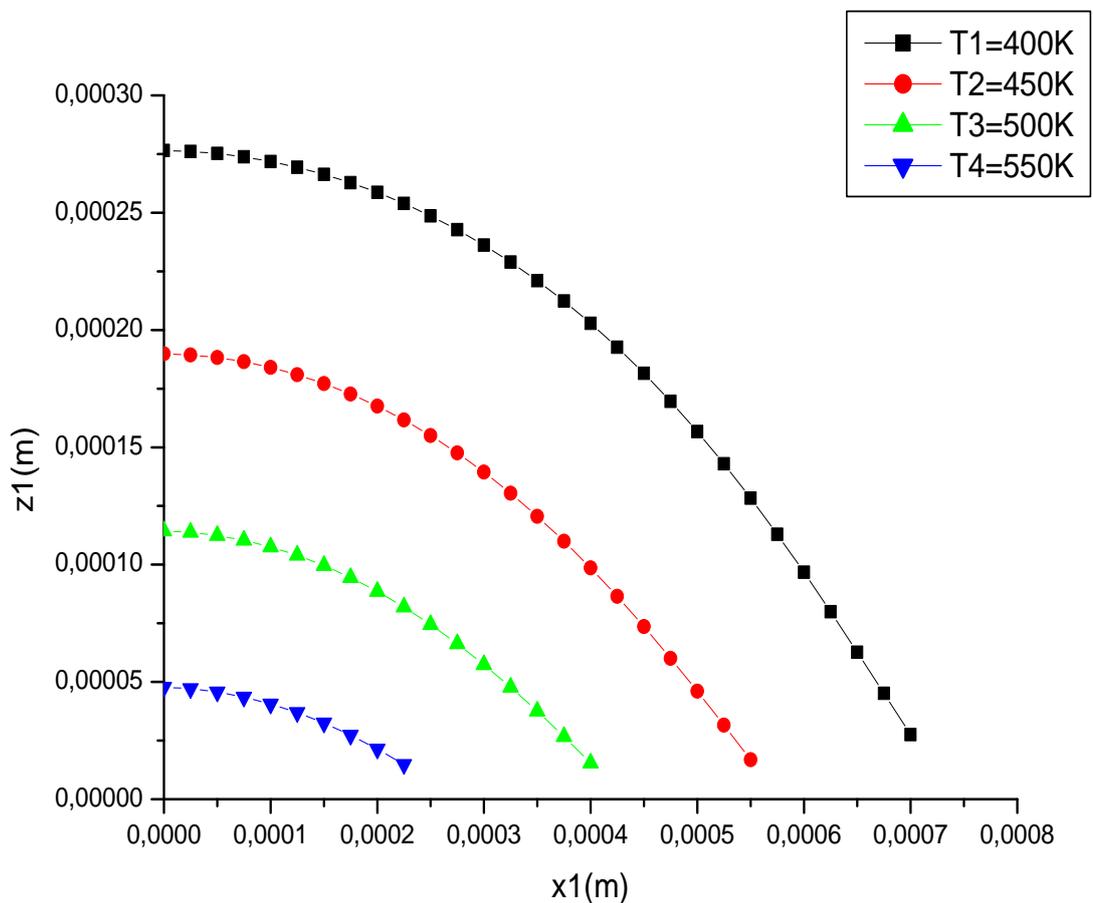


Figure III.23 : Isothermes pour différentes valeurs de température.

Tableau III.10 : Les valeurs maximales pour différentes de températures.

Température (K)	x_1 (m), $z_1=0$	z_1 (m), $x_1=0$
400	0.0007	0.0000275
450	0.00055	0.0000268
500	0.0004	0.0000153
550	0.000225	0.0000483

Nous remarquons que :

z_1 augmente avec l'augmentation de x_1 .

x_1 et z_1 augmentent avec l'augmentation de la température.

Nous avons fait une l'approximation de la variation de l'isotherme $T(x_1, z_1)$ avec une fonction gaussienne, en utilisant le logiciel Origin 6.0. La concordance est pratiquement totale pour nos données pour $a=b=d$ (Figure III.24).

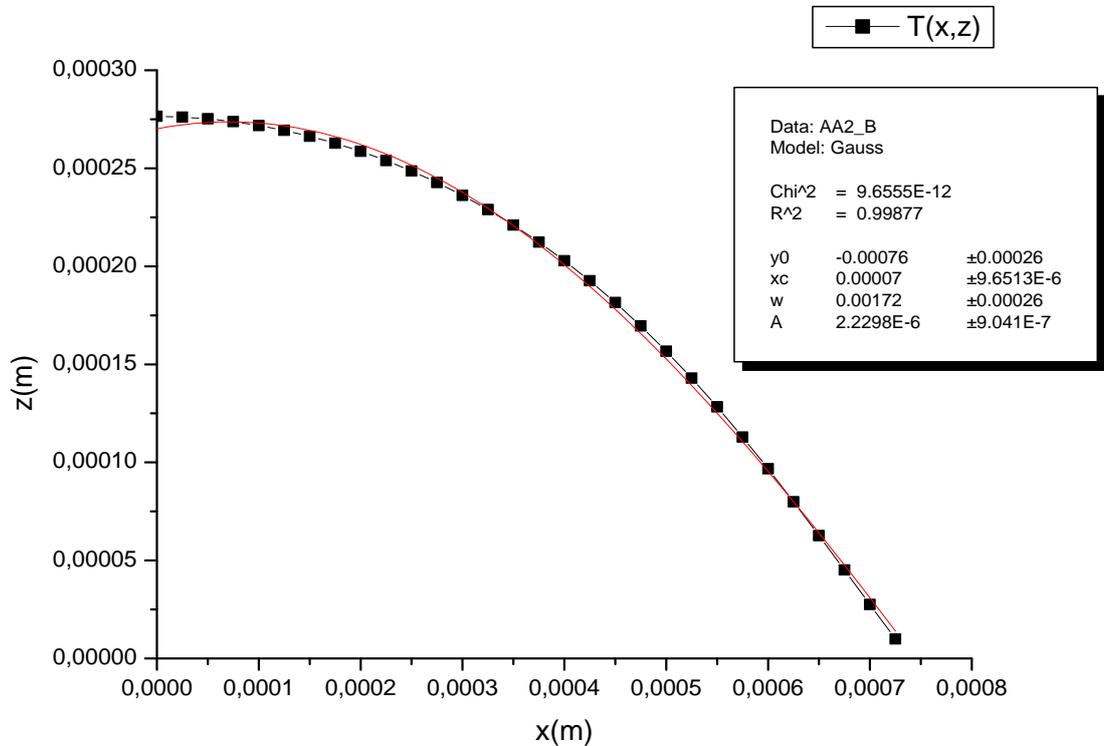


Figure III.24 : Approximation de la variation de l'isotherme $T(x_1, z_1)$ par une fonction gaussienne.

III.5. L'effet de la géométrie du terme source

Pour étudier l'effet de la géométrie, nous allons proposer deux hypothèses pour le calcul des isothermes avec deux valeurs de température $T_1=400K$ et $T_2=450K$:

- 1^{ère} hypothèse G1 : Longueurs relatives au faisceau laser : $a=1mm$, $b=1mm$, $d=1mm$.
- 2^{ème} hypothèse G2 : Longueurs relatives au faisceau laser : $a=1mm$, $b=1mm$, $d=0.5mm$.

Nous obtenons la figure III.25 :

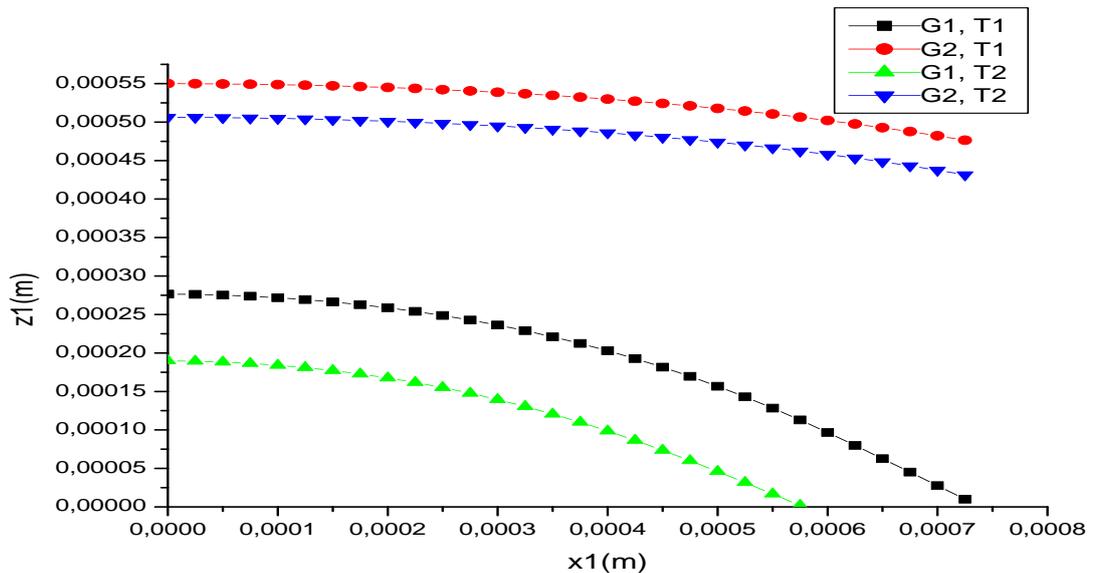


Figure III.25 : Effet de la géométrie du terme source.

Nous remarquons la variation de z_1 et x_1 pour des grandeurs différentes du faisceau laser a , b et d . Le tableau III.11 montre l'effet de la géométrie du terme source.

Tableau III.11 : Effet de la géométrie du terme source.

Longueurs relatives au faisceau laser a, b, d (m)	Température (K)	$X_1(z=0)(m)$	$Z_1(x=0)(m)$
$a=b$ $d=\frac{1}{2}a$	400	0.00123	0.000206
	450	0.00105	0.000299
$a=b=d$	400	0.0007	0.0000275
	450	0.00055	0.0000268



*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Nous avons étudié dans ce mémoire l'opération de soudure par laser Nd-YAG en mode continu de pièces métalliques. Nous nous sommes particulièrement intéressés au terme source. Le matériau à souder est composé de deux pièces symétriques de même alliage ; l'alliage utilisé est l'alliage de magnésium (AZ91). Les conditions expérimentales de soudure sont celles de K. Abderrzak et al. [19].

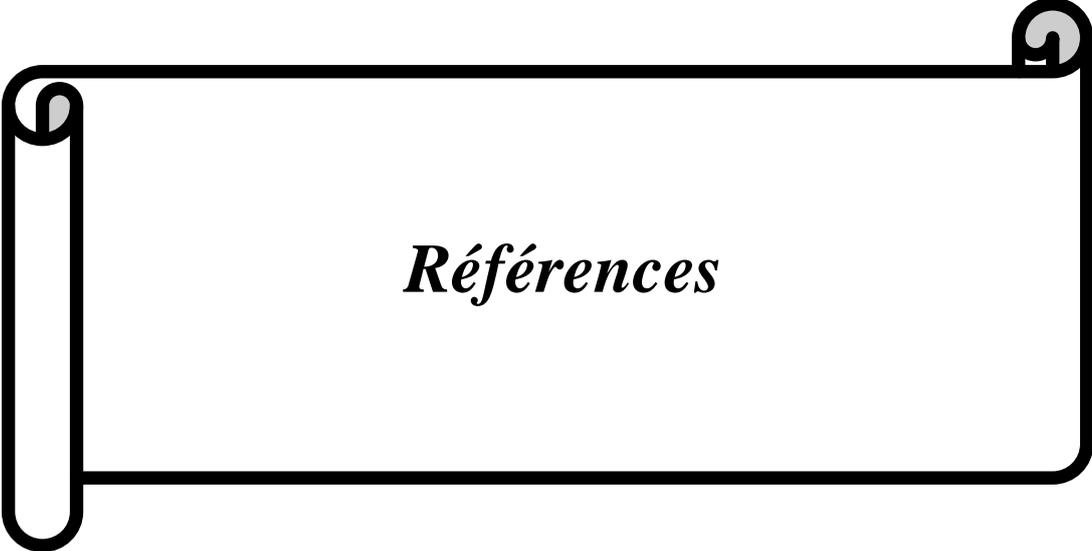
Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions de base nécessaires pour l'étude du procédé de soudage par laser. Nous avons présenté l'équation différentielle de conservation d'énergie et différents modèles de termes source.

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé une modélisation numérique pour la soudure au laser de deux plaques de dimensions (10mm X 5mm X 2mm). Le but est d'estimer la répartition spatio-temporelle de terme source et de la température, ainsi que le calcul des isothermes relatives aux températures des matériaux.

Le troisième chapitre est destiné à l'analyse des résultats relatifs aux distributions de puissance du terme source ($P=300W$, $600W$ et $900 W$) et des distributions spatiales et temporelles des températures des matériaux. Le calcul des isothermes a été fait pour différentes températures (T_1 de $400K$ à $550K$) et suivant des pénétrations différentes du terme source.

Pour les perspectives, nous proposons de résoudre le problème en introduisant les propositions suivantes :

- Soudure par laser mobile.
- Calcul des vitesses de diffusion de température.
- Soudure de métaux différents.
- Calcul pour des propriétés physiques des matériaux non constantes.



Références

Références

- [1] A. Belhadj ; « Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser application aux alliages de magnésium » ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, (2009).
- [2] S. Lemkeddem et F. Khelifaoui; « Modélisation Thermique de Soudures Asymétriques par Soudage Laser » ; 5ème Séminaire National sur le laser et ses Application ; Université de Ouargla, (2009).
- [3] H. Daoui ; « Contribution à l'étude du comportement fluide de plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux » ; Mémoire de Magister ; Université de Ouargla, (2008).
- [4] P. Forten; « Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène Modélisation-Expérience » ; Thèse de Doctorat ; Université de Toulouse, (2002).
- [5] H. Makhlouf; « Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers » ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2008).
- [6] G. Murry ; « Soudage et soudabilité métallurgique des métaux » ; Technique de l'ingénieur, M715, (1994).
- [7] S. Oullam; « Etude du soudage TIG et laser de l'alliage d'aluminium 2024 T3 » ; Mémoire Magister ; Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, (2009)
- [8] C. Ferdinand; « Mise en œuvre et caractérisation d'assemblage soudés par procédés TIG et LASER de tôles d'alliage de titane réfractaires » ; Thèse de doctorat ; Institut National Polytechnique de Toulouse, (2005).
- [9] S. Guerrida; « Etude de la soudure au laser en industrie » ; Mémoire de Master ; université de Ouargla, (2012).
- [10] M. Mostafa;« Etude du perçage et du soudage laser: dynamique du capillaire » ; Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, (2012).
- [11] Y. Robert ; « Simulation numérique de soudage TA6V par laser YAG impulsif » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, (2007).
- [12] 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 mechanicalengineering, N°3, 742, (2011).

- [13] B. Morgan ; « Mécanique des fluides » ; Résumé de Cours, Ecole Normale Supérieure de Cachan, (2009).
- [14] T. Guillanne; « Etude des conditions de soudage laser d'alliage à base Aluminium par voie expérimentale et à l'aide d'une simulation numérique »; Thèse de Doctorat; Université de Bordeaux I, (2012).
- [15] H. Zhao and T. Debroy; « Weld Metal Composition Change during Conduction Mode Laser welding of Aluminum Alloy 5182 »; Metallurgical and materials transactions B, Vol. 32 B, 172- (2001).
- [16] J. Cho; « Implementation of real time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole »; J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 39, 5372-5378, (2006).
- [17] P. Okon, G. Dearden, K. Watkins, M. Sharp and P. French; « Laser welding of aluminium 5083 »; 21st international Congress on applications of lasers and Electro-Optics, Scottsdale, ISBN 0-912035-72-2, (2002).
- [18] J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby; « A new finite element model for welding Heat sources »; Metall. Trans. B (process metal), Vol. 15 B, pp. 299-305, (1984).
- [19] K. Abderrzak, S. Bannour, H. Mhiri, G. Lepalec and M. Autric; « Numerical and experimental study of molten pool formation during continues laser welding of AZ91 magnesium alloy » ; Computational Materials Science, Vol. 44, pp 858–866, (2009).
- [20] S. Bennour, K. Abderrazak, H. Mhiri and G. Palec; « Effects of temperature dependant material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium » ; Optics & Laser Technology, Vol. 44, pp 2459-2468, (2012).
- [21] O. Babahani; « Contribution à l'étude des plasmas lors de déposition sur couche mince par procédés CVD »; Mémoire de Magister; Université de Ouargla, (2004).
- [22] S. Guerrida ; Communication privée, 2018.

Répartition spatiale et temporelle d'énergie de sources lasers utilisées dans les dispositifs de soudage aux lasers de pièces d'alliages métalliques

Résumé

Le soudage au laser est largement utilisé dans l'industrie et le traitement des matériaux. Dans notre travail nous avons utilisé un laser Nd-YAG dans le cas fixe (immobile) pour le soudage de deux plaques identiques d'alliage de magnésium (AZ91). Nous proposons un modèle numérique sous le langage de FORTRAN pour déterminer la répartition spatio-temporelle du terme source et de la température de la pièce à souder et calcul des isothermes. Pour cela, nous avons utilisé les équations de conservation de l'énergie et l'enthalpie de fusion pour le changement de phase. Pour la résolution numérique nous avons utilisé la Méthode des Différences Finies et l'algorithme itératif de Gauss-Seidel. Des calculs ont été faites suivant les puissances et les dimensions du terme source du laser.

Mots-clés:

Sidérurgie, soudure aux lasers, source laser, modèle fluide.

توزيع المكاني و الزماني لطاقة المصدر المستخدمة في أجهزة اللحام بالليزر داخل الصفيحة المعدنية

ملخص:

يستعمل التلحيم بالليزر بشكل كبير في الصناعة و معالجة المواد في دراستنا هذه استعملنا ليزر **Nd-YAG** المستمر في الحالة الساكنة من اجل تلحيم صفيحتين متماثلتين (AZ91). ولقد قمنا باقتراح نموذج عددي بلغة الفورتون يمكننا من إيجاد توزيع مصدر الحرارة ودرجة الحرارة في كل موضع وكل لحظة لصفيحة وتحديد النقاط التي لها نفس درجة الحرارة. من اجل ذلك استعملنا معادلاتي انحفاظ الطاقة كما اخترنا استخدام طريقة الفروق المنتهية و خوارزمية غوص صيدل. كما قمنا بالحساب من أجل قيم مختلفة لاستطاعة الليزر وأبعاده.

الكلمات المفتاحية:

صناعة الحديد و الصلب, التلحيم بالليزر, مصدر الحرارة, نموذج الموائع.

Spatial and temporal energy distribution of laser sources used in laser welding devices of metal alloy parts

Summary:

Laser welding is widely used in industry and materials processing. In our work we used a **Nd-YAG** laser in both cases fixed for welding of two identical magnésium plaque (AZ91). We proposed a numerical model in the language **FORTRAN** to determine the spatio-temporal distribution of heat source and temperature distribution to the welded part and isothermal. For numerical resolution we have used **the finite difference** method and the algorithm of **Gauss-Seidel**. The presented results are for different values of power laser and dimensions of the source term.

Keywords :

Steel industry, laser welding, laser source, fluid model.