

Républ ique Al gérienne Démocratique et Popul aire
Ministère de l 'Enseignement Supérieur
et de l a recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Facul té de Technol ogie
Dépar tement de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l 'obtention du dipl ôme de

MASTER

Fil ière : Génie Mécanique

Spécial ité : Energétique

Par :

BENSADIAbdesl em

BOUDRAHEM Yacine

BOUFADENE Yanis.Essaid

Thème

Analyse mathématique de problème de fissure thermique lors de
traitement thermique superficiel par laser.

Soutenu le 15/10/2020 devant le jury composé de:

Mr.	H. ALI AGHA	Président
Mr.	N.BOUTALBI	Rapporteur
Mr.	M.HAMDI	Examineur

Année Universitaire 2019-2020

Dédicace

On dédie ce modeste travail à nos très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils ont consenti le long de notre parcours, et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A tous les membres de la famille.

A tous mes amis.

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

Remerciement

Nous remercions le bon dieu pour le courage, la pertinence qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

Nous souhaitons adresser nos remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire

Nous tenons à remercier Mr BOUTALBI Nadir, notre promoteur qui est toujours à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide, le temps qu'il nous a consacré.

Aussi nos remerciements s'adressent à l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia et surtout nos enseignants durant notre cursus universitaire.

Introduction générale	1
CHAPITRE I : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL	
I.1 Généralités et historiques sur les lasers.....	3
I.2 Principes de fonctionnement du laser	5
I.2.1 Caractéristiques remarquables de la lumière laser.....	6
I.2.2 Types et mode de fonctionnement du laser.....	7
I.2.2.1 Mode de fonctionnement du laser.....	7
I.2.2.2 Type de lasers	7
I.3 Interaction laser- matière	8
I.4 Traitement de surface par irradiation laser	10
I.4.1 Place et enjeux de traitement thermique de surface par laser.....	11
I.4.2 Modification de microstructure sans apport de matière.....	12
- A. Trempe superficielle.....	13
- B. Fusion superficielle.....	13
- C. Traitement avec vaporisation.....	14
I.4.3 Modification de microstructure avec apport de matière	15
- A. Formation d'un revêtement	15
- B. Formation d'un composite superficiel.....	16
- C. Formation d'un alliage superficiel.....	17
I.5 Conclusion :	19
Chapitre II : MODELISATION MATHEMATIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE	
II.1 Introduction	20
-Qu'est-ce qu'un modèle ?	20
-Qu'est-ce qu'une simulation ?	20
II.2 Modélisation et simulation de trempe au laser	20
II.2.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles.....	21
II.2.1.1 Conditions aux limites	21
II.3 Modèles mathématique la trempe au laser.....	22
II.3.1 Modèles analytiques	22
II.3.2 Les modèles numériques	23
II.3.3 Modèles de simulation.....	24

II.4 Problème de Fissures thermique.....	26
II.4.1 Influence de Gaz de protection.....	26
II.5 Conclusion :.....	27

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III .1 Description du modèle	28
III. 1.1 Hypothèses simplificatrices.....	28
III. 1.2 Formulation des équations	28
III. 1.2.1 Equation de base.....	28
III. 1.2.2 Conditions initiales et aux limites	29
III. 1.3 Résolution du modèle :.....	29
III. 1.3.1 Méthode des différences finies :.....	31
III. 1.4 Résultats et discussion :.....	32
Conclusion générale	54

Listes des figures

Figure I.1 : Schéma des éléments essentiels d'un laser	5
Figure I.2 : Applications des faisceaux lasers	10
Figure I.3 : Fusion superficielle par irradiation laser	14
Figure I.4 : Formation d'un revêtement de surface avec prédépôt d'un matériau d'apport.....	15
Figure I.5 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser	16
Figure I.6 : Formation d'un composite superficiel.....	16
Figure I.7 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.	17
Figure I.8 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.....	17
Figure I.9 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un prédépôt d'éléments d'addition.	18
Figure II.1 Conditions aux limites.	21
Figure III.1 : Modèles mathématique de la trempe superficielle au laser.	28
Figure III.2 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	32
Figure III.3 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	32
Figure III.4 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	33
Figure III.5 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	33
Figure III.6 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	34
Figure III.7 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	34
Figure III.8 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	35
Figure III.9 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	35
Figure III.10 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	36
Figure III.11 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	36
Figure III.12 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	37
Figure III.13 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	37
Figure III.14 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	38
Figure III.15 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	38
Figure III.16 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	39
Figure III.17 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	39
Figure III.18 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	40
Figure III.19 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	40
Figure III.20 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	41
Figure III.21 Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	41

Figure III.22	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	42
Figure III.23	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	42
Figure III.24	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	43
Figure III.25	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	43
Figure III.26	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	44
Figure III.27	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	44
Figure III.28	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	45
Figure III.29	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	45
Figure III.30	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	46
Figure III.31	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	46
Figure III.32	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	47
Figure III.33	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	47
Figure III.34	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	48
Figure III.35	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	48
Figure III.36	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	49
Figure III.37	Profil de température en fonction du temps pour différents position x.....	49
Figure III.38	Profile de température maximale en fonction de biot.	51
Figure III.39	Profile de température maximale en fonction De la longueur x	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison de sources conventionnelles et récentes.12
Tableau III.1 : Les valeurs de la température maximale et le biot.50
Tableau III.2 : les valeurs de la température maximale et de la longueur x.....52

Nomenclature

a	diffusivité thermique du matériau	m^2/s
Cp	Capacité thermique	J/kg.k
h	Coefficient de convection thermique	$W/m^{-2}K^{-1}$
I_0	Pic de l'intensité laser	W/m^2
\dot{I}_0	Puissance de la source laser	W/m^2
k	Conductivité thermique	W/mK
$n_\lambda k_\lambda$	indices optiques du matériau à la longueur d'onde incidente λ .	
q'	Source interne générée par la source laser	W/m^3
R_λ	coefficient de réflexion à la longueur d'onde incidente λ ,	
R	Réfectivité de surface	
t	temps d'interaction	
t	Temps	s
T(x,t)	Température	K
x	Distance	m
X	Distance réduite	μm
Z	Profondeur affectée thermiquement	
σ_λ	Profondeur de pénétration optique	
α	Diffusivité thermique	m^2/s
τ	Temps réduit	$\lambda x/\sqrt{\alpha}$
ρ	Densité	kg/m^3
μ	Coefficient d'absorption	1/m
Θ	Température adimensionnelle	
Bi	Nombre de Biot	
TTL	Traitement thermique par laser	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis l'invention du premier laser en 1960, la diversité des lasers en couleurs, taille ou puissance n'a fait que croître. L'outil laser est capable de percer, découper et souder avec vitesse et précision. Il est aussi utilisé en médecine où il remplace les bistouris les plus précis et cautérise les coupures. Le laser intervient aussi dans les analyses les plus fines, en physique, en chimie ou en biologie, où il permet soit de manipuler les atomes ou les molécules individuellement, soit de véritablement déclencher et photographier des réactions chimiques ou biologiques.

L'industrie est un grand consommateur de lasers, que ce soit pour l'usinage et la transformation des matériaux ou pour l'instrumentation industrielle.

Les traitements de surface répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux, on utilise fréquemment des lasers de puissance pour changer ou améliorer les propriétés mécaniques des matériaux tels que leur dureté, leur dureté superficielle, leur résistance à la fatigue.... Le laser offre ainsi un moyen efficace et précis pour les traitements de surface en contrôlant les modifications des microstructures superficielles. Ainsi le durcissement des matériaux peut se faire par faisceau laser qui contrairement aux procédés conventionnels de traitement thermique, fait que seulement une mince couche est soumise au traitement. Les effets du traitement thermique par laser dépendent essentiellement du degré de contrôle de la distribution spatio-temporelle de la température.

Malgré ses avantages, les coûts d'investissement élevés, le besoin d'expertise, l'instabilité des sources laser et le manque de contrôle du procédé amenaient autrefois les entreprises à préférer les procédés de trempe conventionnelle (four, flamme, carburation).

Durant la dernière décennie, les développements technologiques des sources et des équipements laser ont permis une réduction des coûts d'acquisition, un allongement de la durée de vie des équipements et une amélioration du contrôle du procédé et surtout une augmentation de la qualité des pièces produites. La recherche a amené à une bonne maîtrise de la trempe au laser et a permis de prouver son efficacité sur diverses composantes mécaniques de pointes telle que des composantes de turbines de réacteurs. Le laser est donc une option de plus en plus compétitive face aux procédés de trempe conventionnelle.

Au cours des années 2000, plusieurs équipes de recherche ont réussi à simuler le procédé de trempe au laser de manière très efficace. Ces efforts de modélisation numérique permettent de

réduire les investissements en ressources humaines et les manipulations en laboratoire nécessaires pour développer des recettes de trempe. Les plages d'opérations établies par les simulations orientent les essais, diminuent la perte de composants tests et réduisent les analyses métallographiques nécessaires. La modélisation peut également permettre de justifier la sélection d'un matériau de fabrication ou guider le choix d'équipement laser pour effectuer un travail donné.

La majorité des modèles retrouvés dans la littérature sont développés dans le but de valider l'approche numérique ou de définir des paramètres d'opération du laser afin d'obtenir des conditions métallurgiques souhaitées.

La Première Partie consiste en une vaste synthèse bibliographique, dans laquelle sont d'abord rappelées les notions fondamentales concernant les lasers et l'interaction laser-matière, puis les principaux types de traitements de surface par irradiation laser avec quelques-unes de leurs applications industrielles, enfin les facteurs inhérents et les conditions du procédé de trempe au laser et enfin le contrôle de processus de traitement thermique superficiel par laser.

La deuxième partie décrit la modélisation et la simulation : généralités sur la modélisation et simulation du procédé de trempe au laser, en suite les modèles mathématiques de la trempe au laser, ainsi l'influence de gaz de protection et enfin le problème de fissures thermique superficielle provenant lors de traitement.

La troisième partie est consacrée à la modélisation et la simulation, qui est le but de notre étude, une analyse mathématique pour résoudre le problème de fissure thermique superficielle lors de traitement par laser pour un matériau semi infini unidirectionnel. La résolution d'une équation de chaleur (Fourier) adimensionnel sous le logiciel Maple nous a permis de définir un nombre de Biot afin d'éviter le problème de fissure thermique.

**CHAPITRE I : LES LASERS ET LEURS
APPLICATIONS AU TRAITEMENT
THERMIQUE SUPERFICIEL**

I.1 Généralités et historiques sur les lasers:

En mai 1960, Theodore MAIMAN décrit le fonctionnement du premier laser à rubis. Depuis, le laser est devenu incontournable dans l'industrie, la médecine, notre vie quotidienne, mais aussi dans la recherche. Dans un article publié en 1917, Albert Einstein introduit un troisième processus : l'émission stimulée. Il s'agit du processus inverse de l'absorption, se produisant, comme elle, en présence de rayonnement incident résonnant avec la fréquence de transition des atomes.

Lors de l'émission stimulée, un photon d'énergie $h\nu$ induit la désexcitation d'un atome du niveau 2 vers le niveau 1. Celle-ci s'accompagne de l'émission d'un photon inducteur de même fréquence, même direction de propagation et même état de polarisation. Le faisceau incident de lumière « s'enrichit » en photons identiques pour venir créer une amplification de la lumière. Le photon créé par émission stimulée possède les mêmes propriétés que le photon « déclencheur » (fréquence, phase, direction de propagation, état de polarisation).

Cependant pour que le processus d'absorption ne cache pas le processus d'émission il est nécessaire qu'il y ait plus d'atomes dans l'état haut que dans l'état bas. Or, dans la matière les particules sont beaucoup plus nombreuses dans l'état fondamental que dans un état excité. Il a alors fallu trouver un moyen de renverser la tendance thermique pour obtenir, dans le milieu, plus de particules dans un état excité que dans un état fondamental, c'est-à-dire réaliser une inversion de population.

Cela semblait irréalisable car le coefficient de probabilité de retombée spontanée des atomes $A_{2 \rightarrow 1}$ est très grand : de 10^6 à 10^9 par seconde. Albert Einstein avait notamment montré que cette probabilité était proportionnelle au cube de la fréquence.

Finalement Charles Hard Townes a utilisé l'idée d'Einstein pour construire son premier appareil, en 1954. Il se sera passé presque 40 ans pour passer de l'imagination d'Einstein à la réalisation pratique de l'émission stimulée. Charles Townes travaillait sur la microscopie micro-onde des molécules à l'aide d'oscillateurs électroniques. Ainsi en passant de la lumière, c'est-à-dire des fréquences de 106 Ghz, aux micro-ondes, fréquences de l'ordre du GHz, la probabilité de retombée spontanée des atomes se trouve divisée par un million au cube !

Toute l'astuce de son appareil résidait dans le fait que les atomes dans les niveaux d'énergie E_1 et E_2 n'ont pas le même moment dipolaire électrique. Il a proposé de créer un gradient de champ électrique afin que les atomes dans ces deux niveaux d'énergie ne soient pas déviés de la même façon. Il a choisi de dévier les atomes qui se trouvent dans le niveau E_1 contre une paroi refroidie à

CHAPITRE I : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

l'azote liquide, pour les solidifier. Les atomes dans l'état E2 étaient, par contre, dirigés vers un orifice pour venir tomber dans un guide d'onde, dans lequel se trouvait l'onde incidente. Par la suite, l'onde radar émise ressortait amplifiée. Charles Townes a appelé son appareil Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation.

Charles Townes a ensuite réfléchi à la manière de transposer son appareil utilisant les microondes à des fréquences plus grandes. En 1958 il publie, avec son nouveau collaborateur Arthur Schawlow, un article qui présente une nouvelle idée pour réaliser l'inversion de population : le pompage optique. Charles Townes avait bénéficié, en 1955, d'une année sabbatique au cours de laquelle il avait passé plusieurs mois dans un laboratoire de l'ENS de la rue d'Ulm à Paris avec Albert Kastler. Dans ce laboratoire, Albert Kastler utilisait le pompage optique pour orienter le moment magnétique d'atomes avec de la lumière polarisée.

Les électrons d'un atome possèdent deux états quantiques, un spin up et un spin down. Ils n'ont pas la même énergie, on décrit ainsi deux niveaux d'énergie magnétique. À l'aide de la lumière polarisée Albert Kastler arrivait à transmettre de la rotation aux atomes. Il était ainsi capable de faire passer les atomes d'un niveau d'énergie à un autre en utilisant une sorte de pompage optique.

Charles Townes avait eu le pressentiment qu'il était possible de généraliser le pompage optique pour fabriquer le LASER.

Le premier LASER fabriqué en 1960 par Théodore MAIMAN. Il était réalisé à l'aide d'un rubis dopé avec des ions Chrome.

Le pompage est déclenché par un flash de lumière blanche. Les radiations jaunes, vertes et violettes du flash sont absorbées par les ions Chrome qui changent de niveau d'énergie. On a donc une très grande partie du spectre de la lumière blanche qui est utilisée pour faire monter les atomes dans des niveaux électroniques plus élevés.

Grâce à la largeur de bande offerte par le cristal dopé, seul 10% de la lumière blanche suffit à réaliser l'inversion de population. Les atomes dans le continuum redescendent spontanément par échange d'énergie avec les vibrations thermiques dans le cristal jusqu'à se retrouver très rapidement dans le bas de la bande d'énergie. C'est de cette manière qu'est réalisée l'inversion de population.

Le rubis est un cas particulier, pour la plupart des LASER, l'inversion de population est réalisée entre un niveau très excité et un niveau excité plus bas qui n'est pas l'état fondamental.

Par la suite les LASER sont devenus accordables grâce à de nouveaux colorants élaborés par les chimistes afin de faire varier les longueurs d'onde. [1]

I.2 Principes de fonctionnement du laser

Le mot LASER a été formé par les initiales de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, c'est-à-dire Amplification de la Lumière par Émission Stimulée du Rayonnement. Le laser est essentiellement constitué de trois éléments principaux :

- un milieu actif ou milieu amplificateur ;
- une source de pompage ;
- un résonateur optique ou cavité optique.

La figure 1 représente le schéma général d'un laser.

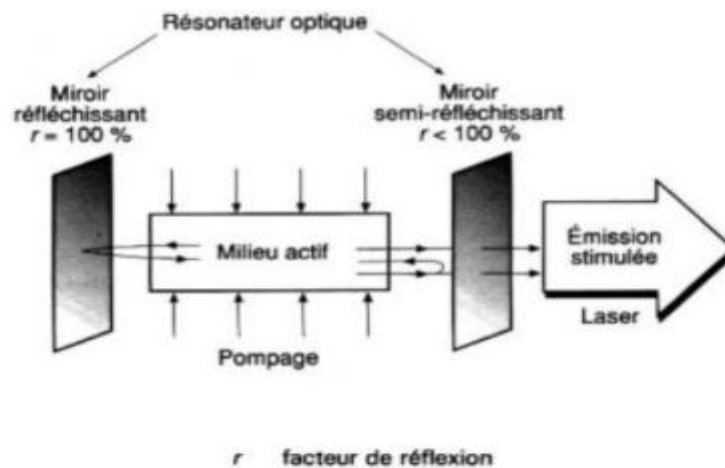


Figure I.1 – Schéma des éléments essentiels d'un laser [2]

• Milieu actif

Atomes et lumière peuvent interagir mutuellement. Quand un atome est exposé à une radiation électromagnétique, sa distribution de charge électrique est affectée périodiquement par l'énergie des photons de la radiation. Par conséquent, un transfert d'énergie a lieu entre les photons et l'atome. Trois processus d'interaction peuvent être envisagés.

- Si l'on considère un atome pourvu des états quantifiés 1 et 2 qui correspondent respectivement aux niveaux d'énergie E_1 et E_2 ($E_1 < E_2$) et si l'on suppose qu'il reçoit l'énergie d'un rayonnement qui interagit avec lui, alors l'énergie de l'atome passe de E_1 au niveau plus élevé E_2 . Ce processus s'appelle l'absorption ; il est réversible et s'accompagne alors d'émission de lumière.
- On sait que, seul, l'état fondamental est le plus stable. Cela signifie qu'après un certain temps, l'atome excité finit par retomber spontanément à l'état fondamental. Il restitue alors

l'énergie $E_2 - E_1$ sous forme d'un photon de fréquence $h\nu$ telle que $h\nu = E_2 - E_1$. Ce phénomène s'appelle l'émission spontanée.

- De plus, si l'atome excité est frappé par un photon provenant de l'extérieur et ayant exactement la même énergie que celle du photon due à l'émission d' E_2 et E_1 , il émet un second photon. Le photon émis et le photon incident ont exactement les mêmes caractéristiques (direction, fréquence, phase, polarisation). Ce processus s'appelle émission induite ou stimulée. On réussit l'émission laser grâce à l'émission stimulée.

Le constituant sur lequel on peut réussir l'émission laser est appelé milieu actif du laser, et il peut être à l'état solide, liquide ou gazeux. [2]

- **Source de pompage**

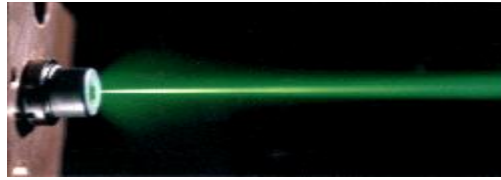
Selon la théorie des états d'énergie, l'inversion de population, qui est indispensable pour obtenir l'émission laser, exige l'excitation des atomes au niveau d'énergie supérieur. Elle peut être obtenue par l'intermédiaire d'une source extérieure d'énergie : c'est le pompage. Il y a actuellement de nombreuses méthodes de pompage (optique, électronique, thermique, chimique, par particules lourdes, par rayonnement ionisant). [2]

- **Résonateur optique**

L'amplification de la lumière peut être obtenue non seulement grâce à la puissance de la source d'excitation extérieure, mais aussi en augmentant la longueur du milieu actif. Le milieu actif ayant évidemment une longueur limitée, il faut trouver un procédé qui permette d'exploiter plusieurs traversées du rayonnement stimulé à travers ce milieu amplificateur. Cela se produit en utilisant une cavité résonnante constituée de deux miroirs (figure I.1), dont l'un semi-réfléchissant laisse échapper une partie de l'émission laser tout en renvoyant l'autre partie dans le milieu dont les atomes excités produisent de nouveau l'émission stimulée. Cette cavité s'appelle résonateur optique, puisque l'on travaille principalement dans le domaine des fréquences des rayonnements infrarouge, visible ou ultra-violet. [2]

I.2.1 Caractéristiques remarquables de la lumière laser

- Le rayonnement laser est très directif (le faisceau diverge très peu). On parle aussi de lumière unidirectionnelle. [3]



- Les photons produits par émission stimulée sont identiques et correspondent à des vibrations de même longueur d'onde : il s'agit d'une lumière monochromatique. On dit aussi que la lumière LASER est caractérisée par une très bonne cohérence temporelle. [3]
- Les vibrations correspondant aux photons émis par émission stimulée sont en phase, on dit que la lumière LASER est caractérisée par une très bonne cohérence spatiale.[3]



I.2.2 Types et mode de fonctionnement du laser

I.2.2.1 Mode de fonctionnement du laser:

Le laser peut fonctionner en continu ou en impulsionnel. Pour le mode impulsionnel, l'énergie est délivrée par une seule ou par une série d'impulsions répétitives. Étant donné que la durée d'une impulsion peut être très courte (10^{-9} s), la puissance crête est très grande (1 MW) même si l'énergie totale délivrée est très faible (10^{-3} J). [4]

I.2.2.2 Type de lasers

Les lasers à solides

Dans les lasers à solides, on utilise en général des cristaux dopés comme milieu amplificateur. Les ions utilisés comme dopants sont les éléments actifs produisant l'effet laser, la matrice cristalline servant essentiellement à les accueillir (et à légèrement influencer sur la longueur d'onde d'émission ou les propriétés thermiques de l'ensemble). La densité d'ions actifs dans un cristal est bien supérieure à celle des milieux gazeux, et on peut ainsi obtenir des gains importants sur de petits volumes. Les cristaux dans les lasers prennent en général la forme d'une tige ou d'un cube de dimensions millimétriques. [5]

Les lasers à gaz

Le milieu amplificateur est ici constitué d'un gaz ou d'un mélange de gaz, en général contenu dans un tube en verre ou en quartz. Lorsqu'on envoie une décharge électrique dans le gaz, on excite

directement ou indirectement (c'est-à-dire suite à des collisions) les atomes, créant ainsi une inversion de population. Pour former un laser, le tube enfermant le mélange gazeux est placé dans une cavité optique, constituée usuellement de deux miroirs se faisant face. [5]

Les lasers à semi-conducteurs ou « diodes lasers »

Les diodes lasers représentent aujourd'hui (et de loin !) les lasers les plus vendus dans le monde. Ces dispositifs bien particuliers utilisent comme milieu amplificateur des matériaux semi-conducteurs (InP, GaAs...), en général sous forme de jonctions ou d'hétéro structures. [5]

Les lasers à colorants

Dans les lasers à colorants, le milieu amplificateur est souvent (mais pas toujours) liquide. Il est composé d'une solution que l'on enferme dans une cuve de verre et qui contient des molécules organiques de colorants. On place ensuite la cuve de verre dans une cavité optique, formée de deux miroirs. Pour l'excitation, c'est une autre affaire : les molécules de colorant diluées dans l'alcool sont bien incapables de conduire correctement le courant électrique, et le pompage se doit donc d'être optique. Les lasers à colorants émettent principalement dans le visible. Le principal avantage de ce type de laser, qui a fait leur succès, est leur très large plage d'accordabilité en longueur d'onde. [5]

I.3 Interaction laser- matière

➤ Paramètres de l'interaction

Les paramètres régissant l'interaction laser-matière sont nombreux. Les effets produits dépendent :

- de la source laser (longueur d'onde, temps d'interaction, densité de puissance délivrée) ;
- du matériau [nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermiques), état de surface (nature chimique, rugosité)] ;
- de l'environnement (nature et pression de l'atmosphère de traitement).

Dans le cas de l'interaction laser-métal, l'interaction du rayonnement a lieu avec les électrons libres au voisinage de la surface. Seule une partie de l'énergie émise par la radiation incidente est absorbée par la surface. [6]

➤ Effets de l'interaction laser-matière

➤ L'interaction laser-matière a pour conséquence l'excitation des électrons au voisinage de la surface du matériau par absorption des photons incidents suivie de la relaxation en un temps très court (10–12 s) de ces électrons induisant trois effets. [6]

— **Un effet thermique** par propagation de la chaleur dans le matériau conduisant au chauffage, à la fusion ou à la vaporisation du matériau selon la densité de puissance (10^2 à 10^8 W/cm²) pour des temps d'interaction variant de la microseconde à la seconde. Ces effets thermiques sont utilisés pour les traitements de surface réalisés en phase solide ou liquide (durcissement, formation d'alliage), la découpe, le soudage, le perçage. Dans le cas où l'énergie est très localisée en surface et imposée en un temps très court (<microseconde), on peut avoir liquéfaction et vaporisation quasi instantanée du matériau induisant les phénomènes d'ablation et la formation d'un plasma sur la cible. Les effets thermiques sur le matériau sont alors faibles car l'énergie est principalement stockée dans les particules enlevées. Ces effets sont utilisés pour le nettoyage et le décapage de surface, le dépôt (LPVD). [6]

— **Un effet photochimique** provoquant des perturbations des liaisons interatomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide-gaz. Dans le cas où l'énergie des photons est de l'ordre de l'énergie de liaison du solide, le traitement pourra induire des ruptures de liaison en surface (traitement des polymères ou gravure du silicium en présence de chlore par laser excimère). Ces effets sont principalement l'objet d'étude en laboratoire. Les principales applications concernent les secteurs de la microélectronique et de l'optoélectronique (dépôt et gravure avec des résolutions spatiales submicroniques). [6]

— **Un effet mécanique** pour des durées d'impulsion de l'ordre de la dizaine de nanosecondes et des intensités sur la cible de quelques GW/cm². Le plasma formé lors de l'interaction est intense et se détend dans l'espace en exerçant une pression sur la surface. Il en résulte la formation d'une onde de choc qui se propage dans le matériau et induit une déformation plastique et une mise en contrainte de la matière impactée (amélioration de la tenue en fatigue du matériau). On augmente le niveau et le temps d'application de cette pression sur la surface solide en interposant devant la cible un matériau transparent à la longueur d'onde du laser incident ce qui a pour effet de retarder la détente du plasma (traitement en milieu confiné). Les pressions générées à la surface de la cible peuvent atteindre plusieurs dizaines de kbars. Le phénomène est cependant limité pour des flux incidents supérieurs à 10 GW/cm² à partir desquels le matériau de confinement devient absorbant (claquage dans le diélectrique). [6]

I.4 Traitement de surface par irradiation laser

Les lasers ont de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la métrologie, la médecine ou la métallurgie. Après 30 ans de développement, le laser a trouvé beaucoup d'applications industrielles, comme le perçage, le découpage, le soudage et les traitements superficiels. Parmi les nouveaux matériaux, les multimatériaux tiennent une place privilégiée car ils permettent de concilier des propriétés incompatibles dans un matériau unique. Or, c'est fréquemment par les traitements localisés ou superficiels que l'on peut réaliser des multimatériaux performants. La modification des surfaces, la densité de puissance et le temps d'interaction entre le laser et le substrat ont une importance fondamentale pour déterminer le type de procédé à choisir (Figure I.5).

Nous présentons les divers procédés types de traitement de surface en utilisant les lasers de puissance en tant que faisceau d'énergie.

Deux catégories de traitements de surfaces par irradiation laser sont distinguées : les traitements sans apport de matière et les traitements avec apport de matière. Les profondeurs traitées varient en général entre 1 μm et 1000 μm . [7]

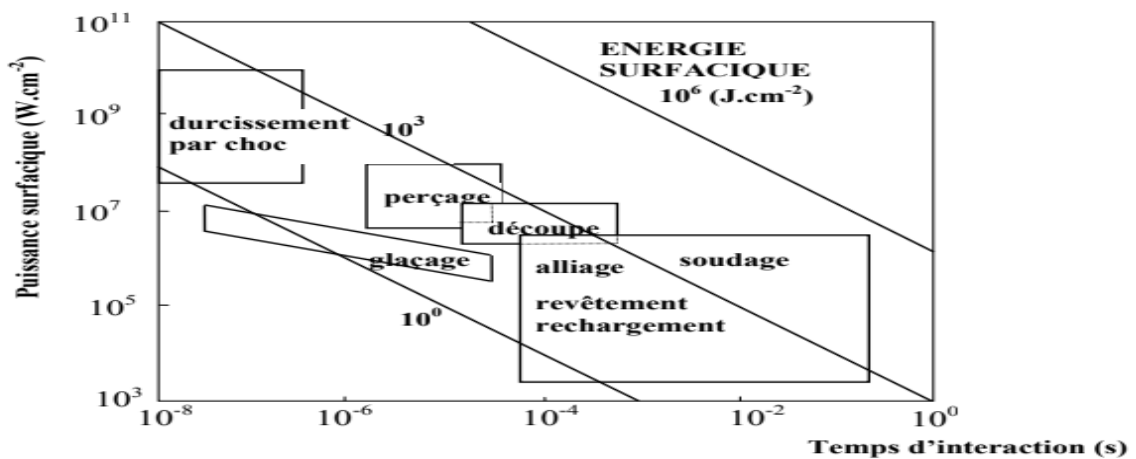


Figure I.2 : Applications des faisceaux lasers [8].

I.4.1 Place est enjeux de traitement thermique de surface par laser

Dans la compétitivité industrielle d'aujourd'hui, c'est un atout considérable que de pouvoir réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques...

Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surfaces sont devenus incontournables, et ont permis de répondre la plupart du temps à ce souci d'optimisation des propriétés superficielles. [9][10].

Une étude récente, menée aux États-Unis, en Europe et au Japon sur les développements prioritaires dans le domaine des matériaux, classe en tête de liste la technologie des traitements superficiels [11], Les enjeux techniques concernent :

- l'amélioration de la résistance à la fatigue sous certains types de sollicitations.
- l'amélioration de la résistance à la corrosion simple ou à la corrosion sous contrainte.
- l'amélioration de la résistance à l'usure.

Les sources de chaleur suffisantes pour permettre les traitements superficiels sont de deux types :

. **Sources classiques** : chalumeau, inducteur à courant , qui présentent vraiment deux inconvénients remarquables :

- Une densité d'énergie de chauffage faible.
- Un temps de mise en température relativement long.

Si parce que la nécessité d'apport rapide d'énergie thermique avec une limitation de la diffusion thermique et un confinement des effets structuraux imposent [2], les chercheurs trouvent d'autres sources qui répondent aux problèmes.

. **Les Sources nouvelles** : faisceau laser, faisceau d'électrons, torche à plasma, constituent posent une solution à ces deux inconvénients, grâce à leurs extrême puissance et localisations énergétiques, elles permettent l'obtention de structures originales et nouvelles, difficiles ou impossibles à obtenir par d'autres moyens [12].

CHAPITRE I : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

Procédés	Avantages	Désavantages
Induction	<ul style="list-style-type: none"> - Taux du processus rapides - Le coût des investissements inférieur à celui du Laser - Haute zone de couverture 	<ul style="list-style-type: none"> - les forces électromagnétiques peuvent gêner la surface. - Invention de bobines complexes pour les travaux spécifiques. (augmentent le coût).
Flamme	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût des investissements inférieur à celui du laser. - Bon marché, flexible et mobile 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance énergétique moyenne - Reproductibilité faible. - Un temps de mise en température relativement long. - Problèmes liés à l'environnement.
Laser	<ul style="list-style-type: none"> - Haute intensité d'énergie (108 –1010 W /cm²) - Aucun contact mécanique entre le substrat et l'outil. - Pas d'exigence de vide(atmosphère, gaz - Traitement rapide. - Durcissement sélectif. - Déformation minimal. - Le travail précis et local 	<ul style="list-style-type: none"> - Haut coût d'investissement - Couches absorbantes nécessaire - Problème de sécurité. - la maintenance faite par les experts.
Faisceau d'électron	<ul style="list-style-type: none"> - Haute intensité d'énergie (108 –1010 W /cm²) - la fraction de déformation est minimale. - Durcissement sélectif 	<ul style="list-style-type: none"> - Haut coût d'investissement - Exigence de vide. - Taux de rendement bas. - Hauts frais d'usinage.

Tableau I.1 : Comparaison de sources conventionnelles et récentes. [13] [14].

L'utilisation des sources nouvelles réduit les risques de déformations et permet une bonne productivité et une grande flexibilité, notamment pour les lasers, où technique de leur utilisation n'est pas compliquée, la conduite du faisceau par des systèmes optiques appropriés rend possible le traitement de zones difficilement accessibles par les autres sources. [4]

I.4.2 Modification de microstructure sans apport de matière

Elle peut résulter, soit d'une transformation structurale à l'état solide, par suite d'un effet de trempe superficielle, soit d'une fusion superficielle, suivie d'une résolidification rapide du matériau irradié.

A. Trempe superficielle

L'irradiation d'un laser de puissance en vue d'un durcissement par transformation structurale, sans atteindre la fusion, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant au cœur de la pièce une bonne ténacité. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliés vise à améliorer leurs propriétés mécaniques de surface, ainsi que leur comportement tribologique (dureté, résistance à l'usure). Les vitesses de refroidissement élevées (plusieurs centaines de degrés par seconde) ont été atteintes et assurent un phénomène d'auto trempe de la zone superficielle par la masse du substrat restée froide. Ceci est efficace pour les aciers qui ont une concentration en carbone suffisante pour promouvoir une transformation martensitique, pour les fontes afin de former une structure perlitique [8]. Cette structure dépend de la vitesse de refroidissement et du diagramme de phases mais généralement, pour ce système, la dureté est augmentée et la résistance à l'usure est améliorée. Cette technique est très utilisée sur des surfaces métalliques pour lesquelles les propriétés métallurgiques et mécaniques peuvent être améliorées, notamment la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue sous sollicitations cycliques. Cela confère à des matériaux métalliques un intérêt commercial dans l'emploi des lasers pour le durcissement par transformation structurale.

Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments fonte de boîte de direction, Fiat pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan pour les traitements des éléments de transmission, afin d'améliorer la résistance à l'usure, obtenir un meilleur refroidissement des cylindres et, en conséquence, développer les moteurs plus compacts. [8]

B. Fusion superficielle

Un traitement thermique avec fusion superficielle est un procédé visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, tenue à la corrosion,...) par une modification de la structure cristalline du matériau sans changement chimique.

Un gaz inerte, l'argon le plus souvent, est insufflé sur le bain de fusion, de manière à assurer une couverture empêchant l'oxydation au contact de l'air (Figure I.6).

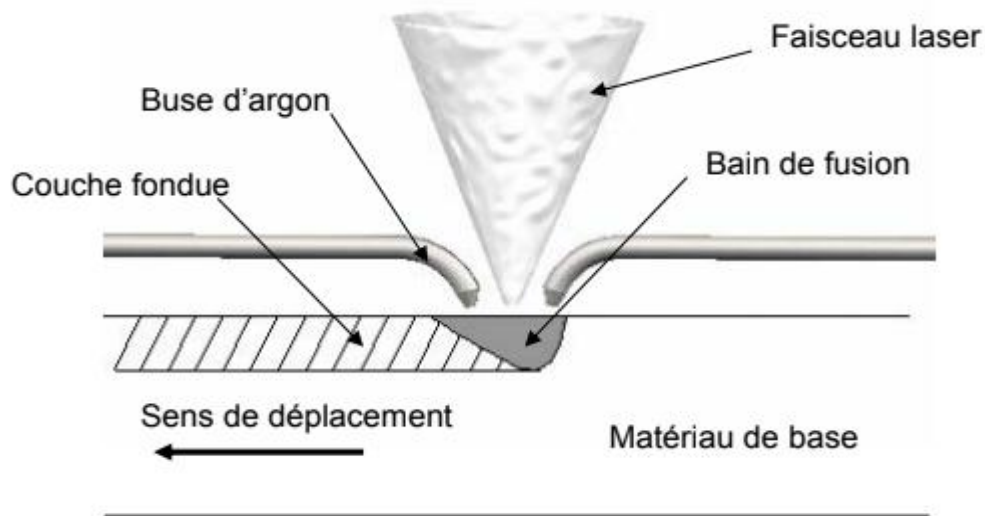


Figure I.3 : Fusion superficielle par irradiation laser.

On peut modifier la nature des phases initiales (apparition de phases métastables), la taille des grains, leur morphologie (structure cellulaire ou dendritique) et leur distribution. Dans certains cas, on peut obtenir une amorphisation de la surface se traduisant par une nette amélioration des propriétés mécaniques et de la tenue à la corrosion. Des travaux effectués en Allemagne ont conduit à la réalisation d'une machine de traitement superficiel des arbres à cames ; la refusions par irradiation laser est mise en œuvre chez Volkswagen depuis 1993.

C. Traitement avec vaporisation

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO₂, Nd-YAG, excimère), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10⁶ à 10¹¹ W.cm⁻²) pendant des impulsions de courte durée (10⁻⁸ à 10⁻⁶ seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface [2]. Les vapeurs métalliques s'ionisent entraînant la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Aux effets thermiques, sont associés des effets mécaniques par les ondes de choc générées par l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs dus à une absorption d'énergie très importante sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures diverses) ou le décapage des surfaces (peinture revêtement, oxyde,...) ainsi que la modification d'états de surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, de l'automobile) sans modification des propriétés du matériau en profondeur.

I.4.3 Modification de microstructure avec apport de matière

La fusion superficielle par irradiation laser avec apport de matière est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface du matériau par une modification chimique. Pour cela, avant ou en cours de traitement, d'autres matériaux ou éléments d'apport sont ajoutés soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée, soit sous forme solide, afin d'élaborer des revêtements ou bien des composites ou alliages superficiels.

A. Formation d'un revêtement

L'irradiation avec fusion du matériau d'apport est un procédé au cours duquel est incorporé au substrat superficiellement fondu, un matériau extérieur, afin d'améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion).

Dans le cas de l'élaboration d'un revêtement par fusion laser, le matériau ou les matériaux d'apport doivent passer par l'état liquide tout en évitant la fusion du substrat sur une épaisseur trop importante afin de réduire le plus possible la dissolution du matériau du substrat dans le bain de fusion et d'altérer le moins possible le revêtement. Le matériau d'apport est déposé au préalable sur le matériau à revêtir (Figure I.7) ou bien il est injecté à l'état de poudre (Figure I.8) dans le bain de fusion. Utilisé en production depuis 1981 dans l'aéronautique en Grande Bretagne, ce procédé a été introduit plus récemment par les Japonais dans l'industrie de grande série pour le stelliteage de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur.

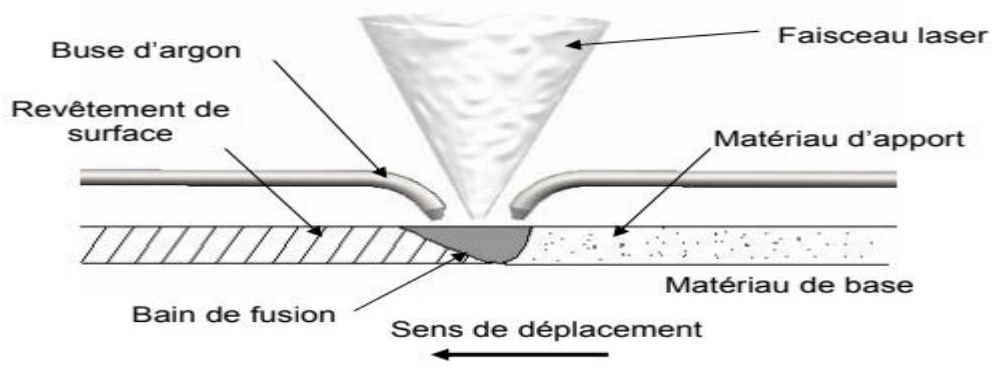


Figure I.4 : Formation d'un revêtement de surface avec prédépôt d'un matériau d'apport.

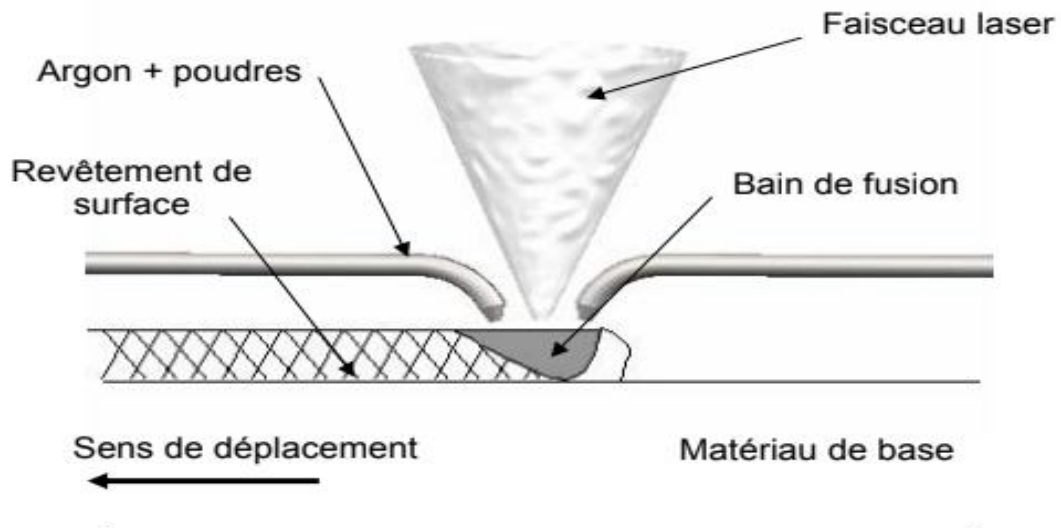


Figure I.5 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser.

B. Formation d'un composite superficiel

Des particules de renfort sont injectées dans le métal fondu superficiellement. Ces particules s'incrustent, sans fondre, dans le bain de fusion. Après solidification du métal, de telles particules de type carbure ou nitrure induisent une augmentation sensible de la dureté dans la zone traitée par fusion (Figure I.9).

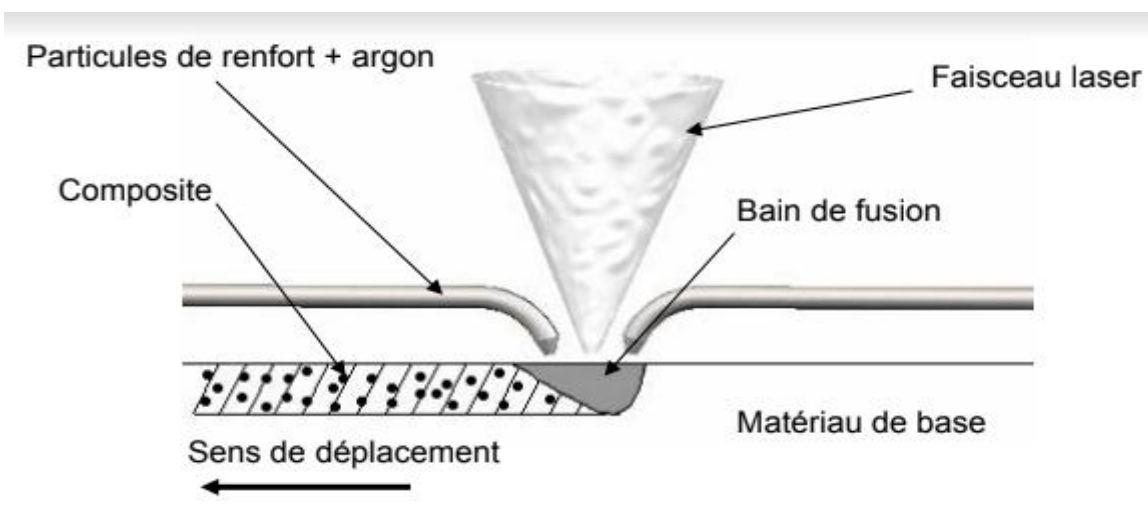


Figure I.6 : Formation d'un composite superficiel.

C. Formation d'un alliage superficiel

Le procédé est sensiblement le même que dans le cas de la formation d'un revêtement, si ce n'est que la fusion d'une couche relativement épaisse du substrat est recherchée. Cette partie du substrat doit incorporer le gaz réactif (Figure I.10) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (Figure I.11) ou déposé préalablement (Figure I.12), afin de former un alliage de surface après solidification.

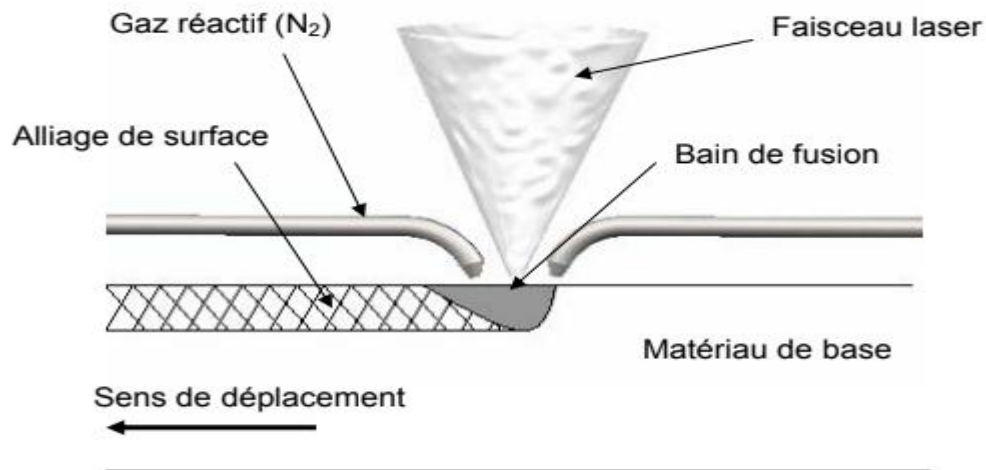


Figure I.7 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.

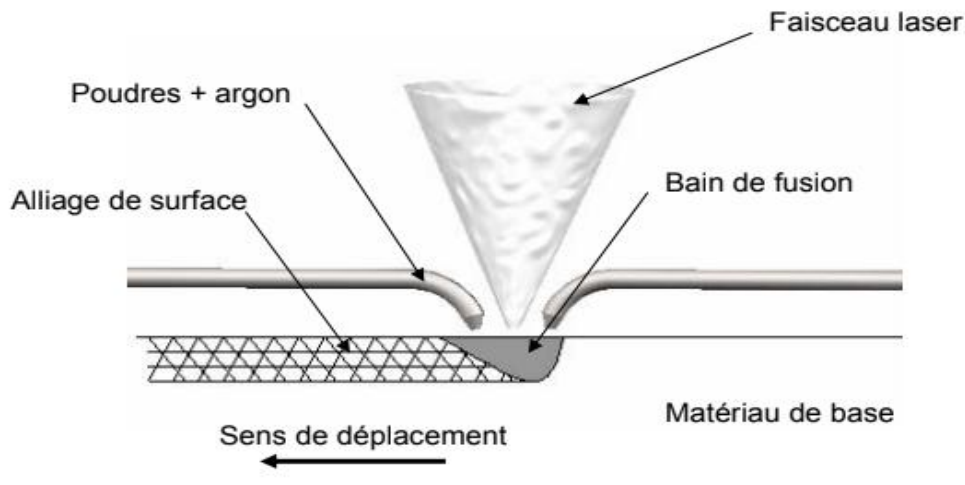


Figure I.8 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.

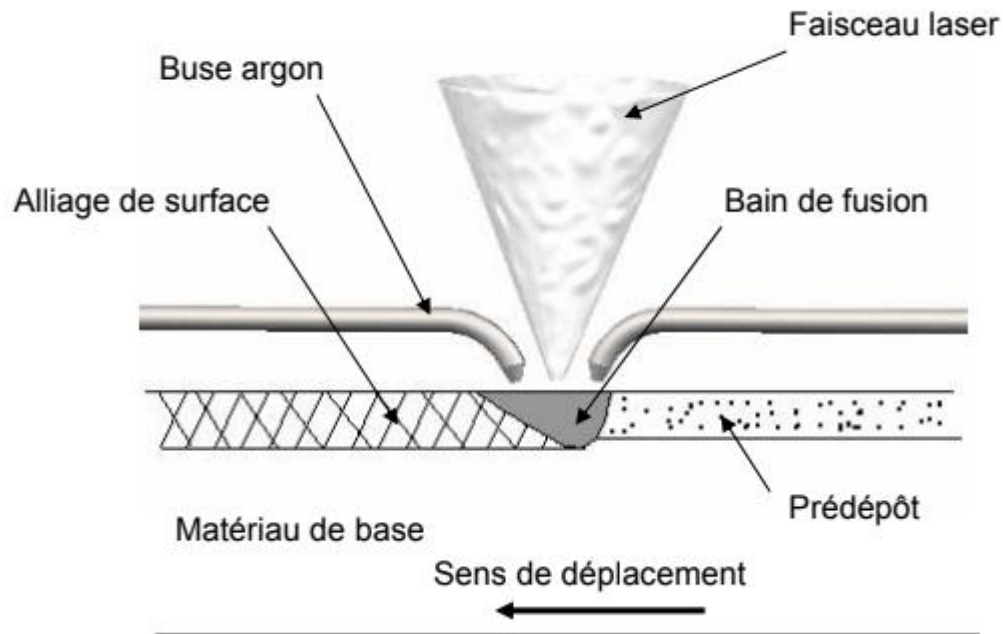


Figure I.9 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré-dépôt d'éléments d'addition.

Les traitements de surface par fusion laser avec apport de matière intéressent de nombreux industriels essentiellement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. Leur fonction est d'allonger la durée de vie de pièces mécaniques en renforçant leur résistance à l'usure et à la corrosion. Le procédé de projection thermique à la torche est fréquemment utilisé. La pièce est revêtue en projetant à grande vitesse un matériau sous forme de poudre partiellement fondue par le plasma. Le principal défaut de ce procédé est lié à l'absence de chauffage du substrat qui provoque un manque d'adhérence du revêtement ainsi que l'apparition de porosité et de fissuration. En revanche, le procédé de fusion laser évite ces inconvénients et permet en outre un traitement localisé aux seules zones soumises aux sollicitations. Les applications concernent, par exemple, l'élaboration de revêtements résistants à l'usure et à l'oxydation, sur les ailettes de compresseurs, sur les bords d'attaque d'aubes de turbines en acier ou sur les encoches de chapeaux d'aubes de turbine.

I.5 Conclusion :

Le laser est une technologie avec des applications uniques, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser ce que les autres sources d'énergie sont incapables de faire, en particulier dans le traitement thermique des matériaux. Les lasers sont utilisés dans plusieurs domaines tels que la médecine, l'industrie et la communication avec la fibre optique. Dans ce nous nous sommes basés sur le traitement thermique superficiel par laser.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté en bref, les généralités et le principe de fonctionnement des lasers, les différents types des lasers et l'interaction laser-matière

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation représentent un vaste champ pour les recherches relatives à l'enseignement scientifique et technologique, exploré depuis plusieurs décennies déjà (Giordan & Martinand, 1987). Les travaux les plus anciens concernant la modélisation en sciences ont été listés par Drouin (1992).

-Qu'est-ce qu'un modèle ? [15]

Un modèle est une représentation testable d'un système ou une interprétation abstraite de la réalité physique qui est accessible à l'analyse et au calcul. La modélisation représente une part considérable du travail mathématique appliqué et nécessite une connaissance approfondie, non seulement des mathématiques appliquées, mais aussi de la discipline scientifique à laquelle elles s'appliquent. En effet, dans de nombreux cas le modèle mathématique n'est encore établi, ou bien il faut en sélectionner un pertinent parmi plusieurs disponibles, ou encore il faut simplifier des modèles connus mais trop complexes.

-Qu'est-ce qu'une simulation ? [16]

Une simulation est l'action d'effectuer un test sur un modèle. Théoriquement, les concepts de modèle et de simulation sont différents, car un modèle est un outil, alors qu'une simulation est l'action d'utiliser cet outil. Néanmoins, ces notions sont liées et, en pratique, elles sont souvent utilisées de manière interchangeable. Le résultat d'une simulation est aussi fréquemment appelé une simulation.

II.2 Modélisation et simulation de trempe au laser

La trempe au laser est un procédé relativement complexe, car elle fait entrer en jeu plusieurs facteurs provenant du mode de transfert énergétique, du matériau traité et des mécanismes prenant part au procédé. [17]

La trempe au laser fut l'objet de plusieurs projets de recherche reliés à des applications industrielles, elle s'est avérée une solution rapide, précise et économiquement rentable pour des volumes importants de pièces.[17]

La modélisation du TTL repose sur la représentation mathématique des phénomènes de transfert intervenant lors du procédé, alors que les modèles sont basés sur la résolution des

équations qui décrivent la conservation de la masse, de l'énergie de la quantité de mouvement. [18][19].

La simulation de procédé de trempe au laser est de plus en plus utilisée par les industrielles pour développer des recettes d'application. Malgré l'investissement initial important, la modélisation et la simulation d'un procédé permettent par la suite de guider la sélection de paramètres d'opération, réduire les manipulations en laboratoire et diminuer les spécimens tests.[17]

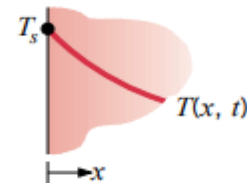
II.2.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles

II.2.1.1 Conditions aux limites

Ces conditions dépendent évidemment du problème étudié. Elles traduisent le lien entre le milieu étudié et le milieu extérieur. Comme l'équation de la chaleur est de premier ordre en temps et de second ordre en espace, on rappelle que deux conditions aux limites dans chaque direction et une condition temporelle (conditions initiale) sont exigées pour aboutir à une solution de l'équation de départ. [20]

1. Température de surface constante

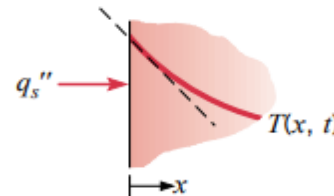
$$T(0, t) = T_s$$



2. Flux thermique de surface constant

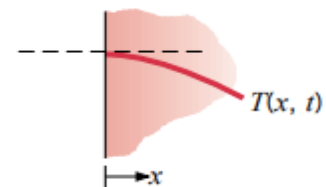
- (a) Flux thermique fini

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_s^n$$



- (b) Surface adiabatique ou isolée

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$



3. État de la surface de convection

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h [T_\infty - T(0, t)]$$

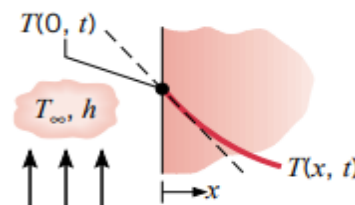


Figure II.1 Conditions aux limites.[20]

Pour déterminer la répartition de la température dans un milieu, il est nécessaire de résoudre la forme appropriée de l'équation de la chaleur. Cependant, une telle solution dépend des conditions physiques existant aux limites du milieu et, si la situation dépend du temps, des conditions existant dans le milieu à un moment initial. En ce qui concerne les conditions aux limites, il existe plusieurs possibilités communes qui sont simplement exprimées sous forme mathématique. Comme l'équation de la chaleur est du second ordre dans les coordonnées spatiales, deux conditions limites doivent être exprimées pour chaque coordonnée nécessaire pour décrire le système. Comme l'équation est de premier ordre dans le temps, cependant, une seule condition, appelée condition initiale, doit être spécifiée. [20]

Trois types de conditions aux limites couramment rencontrées dans le transfert de chaleur sont résumés dans le **figure II.1**. Les conditions sont spécifiées à la surface $x=0$ pour un système unidimensionnel. Le transfert de chaleur se fait dans la direction x positive avec la distribution de température, qui peut dépendre du temps, désignée par $T(x, t)$. La première condition correspond à une situation pour laquelle la surface est maintenue à une température fixe T_s . Elle est communément appelée une condition de Dirichlet, ou une condition aux limites du premier type. Elle est très proche, par exemple, lorsque la surface est en contact avec un solide fondant ou un liquide bouillant. Dans les deux cas, il y a un transfert de chaleur à la surface, tandis que la surface reste à la température du processus de changement de phase. La seconde condition correspond à l'existence d'un flux de chaleur fixe ou constant en surface. Ce flux thermique est lié au gradient de température à la surface par la loi de Fourier. Elle est appelée une condition de Neumann, ou une condition aux limites du second type, et peut être réalisée en liant un radiateur électrique à film mince à la surface. Un cas particulier de cette condition correspond à la surface parfaitement isolée, ou adiabatique, pour laquelle $\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$.

La condition aux limites du troisième type correspond à l'existence d'un chauffage (ou refroidissement) par convection au surface. [20]

II.3 Modèles mathématique la trempe au laser

II.3.1 Modèles analytiques

BLACKWELL [21] à examiné analytiquement le phénomène de l'enlèvement explosif de matière traité, observé par DABBY et PAEK [22], et à calculé le profil de la température dans un corps semi infini durcit avec une source laser assumée comme une loi en décroissance exponentielle avec le profondeur x . Une condition au limite convective est admise et la transformée de Laplace

est utilisée pour résoudre l'équation différentielle de la conduction de la chaleur. Il a montré que la température maximale se déplace à l'intérieur du matériau quand le nombre adimensionnel Bi est plus grand que 0.05.

ZUBAIR S. M et CHAUDHRY M. A [23] [24] ont d'abord discuté la solution fondamentale au problème considéré par BLACKWELL [21]. Ils ont fourni une solution analytique au problème basé sur la transformée de Laplace, dans lequel la matière est soumise à une source laser instantanée, identifiée par la pulsation de Dirac.

YILBAS .B.S et SAMI. M [25], ont obtenu le profil de la température pour une surface du matériau admis comme semi infini, isentropique, avec une source laser dépendante du temps de forme exponentiel : $I = I_0 \exp(-\beta t)$. La résolution est basée aussi sur la méthode de transformé de Laplace. Le profile de la température superficielle à été comparé au profil de la pulsation laser pour différentes valeurs de β . Ils ont trouvé que pour β proche de zéro les deux profils concordent.

YILBAS .B.S et KAYLON .M [26] ont utilisé le même modèle que [27]. Ils ont montré que l'effet du nombre de Bi devient considérable sur le profil de température lorsque $Bi \geq 0.202$.

YILBAS .B.S et KAYLON .M [28] s'appuyant sur le modèle [26]. Avec un traitement cette fois, fait avec des pulsations laser consécutives à des intensités décroissantes, dans l'intervalle de nombre Bi qui varie comme : $0.0002 \leq Bi \leq 0.2$. L'effet de Bi , sur les profils de la température de la surface du à des pulsations répétitives, devient considérable quand $0.01 \geq Bi$. Ainsi, suivant cette série de travaux, on a pu montrer que l'effet de Bi sur le profil de température est important suivant le type de traitement.

Rachid Fakir, et al [29] ont élucidé à travers une étude l'analyse du comportement mécanique de l'acier cylindrique AISI 4340. Échantillons traités thermiquement avec un laser à fibre. Cette étude décrit une méthode d'analyse et d'amélioration du comportement mécanique d'une pièce cylindrique en acier AISI 4340, par son traitement thermique avec un gaz de 3 kW source laser à fibre.

II.3.2 Les modèles numériques

CHEUNG. N et al [30], ont développé un modèle mathématique pour prédire la profondeur de la zone traitée par une source laser de distribution gaussienne indépendante du temps. L'équation de Fourier de la conduction de la chaleur est résolue en utilisant la méthode des différences finies. Dans des coordonnées cylindriques, pour l'étude de la distribution de la température produit dans

un matériau avec des propriétés thermophysiques dépendantes du temps, ils ont obtenu la profondeur à laquelle le durcissement se produit. Les simulations théoriques sont comparées avec les résultats expérimentaux pour un laser CO2 continu.

SHUJA S .Z et YILBAS B. S [31] présente dans leurs études, l'effet du jet du gaz qui agit coaxialement avec la pulsation répétitive du laser, et de façon orthogonale à la surface. Les champs de la température sont prédits numériquement, suivant une approche par volumes finis. L'étude est faite pour inclure trois types de pulsation et deux vitesses du jet du gaz. Ils ont trouvé que pour les pulsations répétitives de grand période de refroidissement, l'effet de la vitesse du jet du gaz n'est pas notable sur le profil de la température selon la face exposée du solide.

ROZNIAKOWSKA .M et YEVTUSHENK Æ A. A [32] effectue un calcul numérique pour la solution de l'équation de la conduction de la chaleur unidimensionnelle linéaire pour un milieu semi infini. L'effet de structure de la source laser simulée comme une source thermique surfacique dépendante du temps d'une seule pulsation pour trois cas, source de type triangulaire, de type rectangulaire, et une source de type gaussien et ont discuté, l'évolution des paramètres adimensionnels de la : température, du flux de chaleur, de la profondeur de durcissement, et la durée de l'impulsion laser .

Zhe Sun, Wei Guo, Lin Li, [33] ont exposé, dans une étude, la modélisation numérique du transfert de chaleur, du transport de masse et de la formation de microstructure dans un processus de dépôt d'énergie dirigé par laser à haute vitesse de dépôt. Dans cette étude un modèle numérique tridimensionnel est établi pour étudier le transport de masse et le transfert de chaleur dans les bassins de fusion à haut taux de dépôt (HDR) L-DED en acier inoxydable 316L. La méthode du volume de fluide (VOF) est utilisée pour suivre les surfaces libres des bassins de fusion, et la méthode enthalpie-porosité est utilisée pour modéliser le changement de phase solide-liquide

II.3.3 Modèles de simulation

BESSROUR .J et al [34] l'étude proposée est une contribution à l'établissement d'un modèle instationnaire qui permet de simuler l'histoire thermique totale du traitement superficiel dans un domaine tridimensionnel, de frontière quelconque, jusqu'au retour à l'équilibre thermique après refroidissement. La formulation du problème intègre un code de calcul par éléments finis pour la résolution de l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire. Le schéma numérique développé permet la résolution avec une condition de frontière mobile moyennant une discrétisation spatio-temporelle adaptée. Il tient compte des non-linéarités dues à la variation des caractéristiques

thermophysiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement aussi que celles par convection.

Rachid fakir et al[35], Étude de cas du procédé de durcissement au laser appliqué à 4340 éprouvettes cylindriques en acier par simulation et validation expérimentale, cette étude présente une approche numérique permettant de prédire le profil de température des éprouvettes cylindriques en acier AISI 4340 en fonction des paramètres du processus de durcissement au laser. Le modèle développé a été construit en utilisant la méthode de la différence finie (MDF) et validé à l'aide d'outils commerciaux d'éléments finis et de données expérimentales. L'approche proposée a été construite progressivement par examen de la distribution de température à l'aide d'équations de diffusion thermique, conditions aux limites et propriétés des matériaux, discrétisation du modèle mathématique à l'aide de la méthode de la différence finie, validation de l'approche proposée par tests et simulation avec le logiciel COMSOL Multiphysics et analyse et discussion des résultats. Faisabilité et efficacité de l'approche proposée pour un modèle précis et fiable capable de prédire le profil de température à l'intérieur du composant chauffé.

P Dinesh Babu et al,[36] Analyse numérique et validation expérimentale de la dureté et des changements microstructuraux lors du durcissement par transformation laser de plaques en acier faiblement allié, Dans cette étude, le durcissement par transformation laser de l'acier EN25 est effectué à l'aide d'un système laser à grenat d'aluminium au néodyme et yttrium à onde continue à onde continue de 2 kW. La simulation numérique de l'écrouissage par transformation laser est réalisée par la méthode des éléments finis en considérant les propriétés thermo-physiques du matériau. Sur la base de la simulation numérique, la température, la distribution de dureté, la profondeur et la largeur durcies et les proportions de phase sont déterminées. La simulation est effectuée en faisant varier la vitesse de déplacement de la pièce. Les résultats de la simulation sont vérifiés avec les données expérimentales et se révèlent satisfaisants avec moins de 5% d'erreur. On observe que près de 97% des phases de la zone durcie sont converties en phase martensitique avec une dureté augmentée d'environ deux fois par rapport au matériau de base.

Tani G. a et al. [37] Simulation de processus de durcissement au laser pour les pièces mécaniques. Dans cet article, une simulation numérique du processus de durcissement par laser est présentée. La méthode des différences finies(MDF) a été utilisée pour résoudre les équations de transfert de chaleur et de diffusion du carbone pour une géométrie de pièce définie. Le modèle est capable de prédire le cycle thermique dans le matériau cible, les transformations de phase et les microstructures résultantes en fonction des paramètres du laser, des dimensions de la

pièce et des propriétés physiques de la pièce. Les effets du chevauchement des pistes du faisceau laser sur les microstructures résultantes sont également considérés. La microstructure initiale de la pièce est prise en compte dans la simulation par une photomicrographie numérisée de la distribution de la perlite de ferrite avant le cycle thermique. Des tests expérimentaux ont été réalisés sur une plaque de C43 et le bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux est démontré.

II.4 Problème de Fissures thermique:

La modélisation numérique permet de simuler un procédé mathématique avec une grande précision, réduisant ainsi le besoin d'expérience mais lors de traitement thermique superficiel les chercheurs dans les labos trouvent toujours un problème fréquent qui est la fissuration thermique superficiel.

La fissuration thermique est le terme technique décrivant la rupture fragile du matériau dans laquelle une mince couche superficielle est devenue excessivement dure et cassante à la suite de cycles rapides de chauffage et de refroidissement par friction. [38]

II.4.1 Influence de Gaz de protection

Pendant les traitements de surface par laser, la zone superficielle de traitement est couverte par un flux gazeux qui est utilisé dans deux buts :

- pour protéger la surface contre l'oxydation et en même temps améliorer la qualité du traitement (aspect de surface, profondeur de traitement, étendue du champ thermique) ;
- pour réaliser les traitements réactifs (carburation, nitruration).

Le flux gazeux peut être amené à la surface à traiter suivant plusieurs méthodes :

- par un ou plusieurs tuyaux qui sont reliés à la buse du laser et par conséquent au mouvement du faisceau laser ou qui sont découplés de la buse mais montés sur dispositif expérimental de façon que la surface irradiée soit toujours couverte par un flux gazeux ;
- par une enceinte de traitement (par exemple en graphite) qui porte à sa surface supérieure une fente étroite, mais d'une largeur suffisante pour que le faisceau puisse pénétrer à l'intérieur ; les parois latérales sont munies de deux trous permettant le passage des tuyaux d'amenée du gaz de protection qui est introduit à l'intérieur de l'enceinte avec un débit suffisant pour créer une atmosphère inerte. . [2]

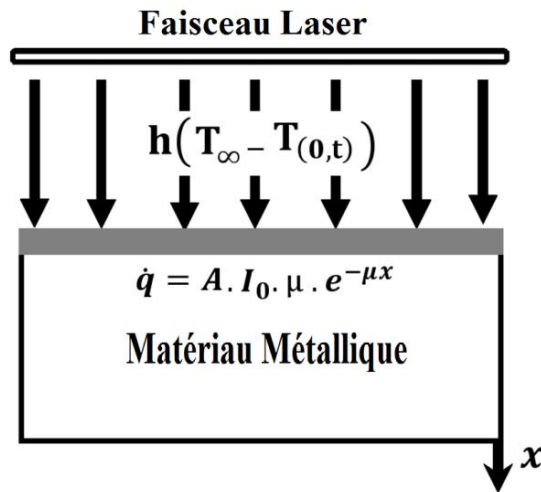
Les gaz employés sont principalement : N₂ , Ar et He. Néanmoins, suivant le matériau, le type de traitement et le résultat exigé, on utilise d'autres gaz comme par exemple : Ar ou N₂ hydrogéné, CO₂, etc.

Enfin, des traitements superficiels par laser peuvent être réalisés sous vide (partiel ou complet), ou dans des enceintes fermées, mais pour des applications très spéciales et limitées. [2]

II.5 Conclusion :

Le deuxième chapitre est consacré à des recherches bibliographiques sur la modélisation et la simulation. Et nous avons essayé de mettre au clair la modélisation et la simulation du procédé de trempe au laser aussi nous avons présenté les différents modèles mathématiques de trempe au laser. Grâce à cette étude nous avons découvert que lors du traitement thermique par laser il se forme des fissures thermiques. Dans le troisième chapitre nous procéderons à l'analyse mathématique du problème de fissure thermique puis nous essayerons de définir les conditions afin d'éviter ce phénomène.

III.1 Description du modèle (Modélisation de trempe thermique par laser) :



Représentation mathématique

Figure III.1 : Modèle mathématique de la Trempe superficielle au laser.

III.1.1 Hypothèses simplificatrices

- La source laser d'intensité constante, indépendante du temps
- Le matériau traité est isotrope semi infini.
- o Les propriétés thermo physiques du substrat sont indépendantes de la température.
- o Les pertes d'énergie par rayonnement sont négligeables.

III.1.2 Formulation des équations

III.1.2.1 Equation de base

L'équation de Fourier descriptive de la conduction thermique en une dimension avec une source d'énergie interne est donnée par comme :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q' \quad \text{III.1}$$

Le terme de la source d'énergie laser interne est modélisé comme

$$q' = I_0(1 - R)\mu \exp(-\mu x)$$

Avec $(1-R) = 1 \cong R = 0$

III.1.2.2 Conditions initiales et aux limites

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x,0) = T_0 \quad \text{III.2} \\ -k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h[T_\infty - T(0,t)] \quad \text{III.3} \\ \frac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{III.4} \end{array} \right.$$

■ Un groupe de variables adimensionnels défini comme suit, facilite l'étude.

$$\theta = \left(\frac{T(x,t) - T_0}{I_0} \right) k \mu$$

$$X = \mu x$$

$$\tau = \mu^2 \alpha t$$

$$Bi = \frac{h}{\mu k}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C p}$$

III.1.3 Adimensionnalisation du modèle :

■ Résolution des équations (III.1, III.2, III.3, III.4), en fonction de nombres adimensionnels cités.

$$\triangleright \rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q' \quad \text{III.1}$$

$$\triangleright q' = I_0 \mu e^{-\mu x}$$

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I_0 \mu e^{-\mu x}$$

$$T(x,t) = \frac{\theta I_0}{k\mu} + T_0. \Rightarrow \partial T(x,t) = \frac{I_0}{k\mu} \partial \theta. \Rightarrow \partial^2 T(x,t) = \frac{I_0}{k\mu} \partial^2 \theta$$

$$t = \frac{\tau}{\mu^2 \alpha} \Rightarrow \partial T = \frac{\partial \tau}{\mu^2 \alpha}$$

$$x = \frac{X}{\mu} \Rightarrow x^2 = \frac{X^2}{\mu^2} \Rightarrow \partial x^2 = \frac{2X}{\mu^2} = \frac{1}{\mu^2} \partial X^2$$

$$\rho C_p \frac{\frac{I_0 \partial \theta}{k\mu}}{\frac{\partial \tau}{\mu^2 \alpha}} = k \frac{\frac{I_0 \partial^2 \theta}{k\mu}}{\frac{\partial X^2}{\mu^2}} + I_0 \mu e^{-\mu \frac{X}{\mu}}$$

$$\rho C_p \frac{I_0 \partial \theta \mu^2 \alpha}{k\mu \partial \tau} = k \frac{I_0 \partial^2 \theta \mu^2}{k\mu \partial X^2} + I_0 \mu e^{-x}$$

$$\rho C_p \frac{\partial \theta \alpha}{k \partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}$$

$$\rho C_p \alpha = k$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + e^{-X} \quad \text{III.1'}$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad \text{III.2}$$

$$\triangleright \theta(X, \tau) = \left(\frac{T(x, \tau) - T_0}{I_0} \right) k\mu$$

Pour t=0 $\tau = 0$

$$\theta(X, 0) = \left(\frac{T(x, 0) - T_0}{I_0} \right) k\mu$$

On a $T(x, t = 0) = T_0$

$$\theta(X, 0) = 0 \quad \text{III.2'}$$

$$\triangleright -k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h [T_\infty - T(0, t)] \quad \text{III.3}$$

$$x = 0 \rightarrow X = 0$$

$$t = \frac{\tau}{\mu^2 \alpha} \quad Bi = \frac{h}{k\mu}$$

$$-k \frac{\partial \theta(0, \tau) I_0 \mu}{k\mu \partial X} = h \left[\frac{\theta_\infty I_0}{k\mu} + T_0 - \frac{\theta(0, \tau) I_0}{k\mu} - T_0 \right]$$

$$-k \frac{\partial \theta(0, \tau) I_0 \mu}{k\mu \partial X} = \frac{I_0 h}{k\mu} (\theta_\infty - \theta(0, \tau))$$

$$-\frac{\partial\theta(X,\tau)I_0}{\partial X} = I_0Bi(\theta_\infty - \theta(0,\tau))$$

$$\frac{\partial\theta(0,\tau)}{\partial X} = Bi(\theta(0,\tau) - \theta_\infty) \quad \text{III.3'}$$

$$\triangleright \frac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{III.4}$$

$$\frac{\frac{\partial\theta(\infty,t)I_0}{k\mu}}{\frac{\partial X}{\mu}} = 0$$

$$\frac{\partial\theta(\infty,\tau)I_0\mu}{k\mu\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial\theta(\infty,\tau)I_0}{\partial X} \frac{1}{k} = 0$$

$$\frac{\partial\theta(\infty,\tau)}{\partial X} = 0 \quad \text{III.4'}$$

III.1.3.1 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 : [39]

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

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

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

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

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

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

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

III.1.4 Résultats et discussions :

Pour Biot = 0

t = 0.10

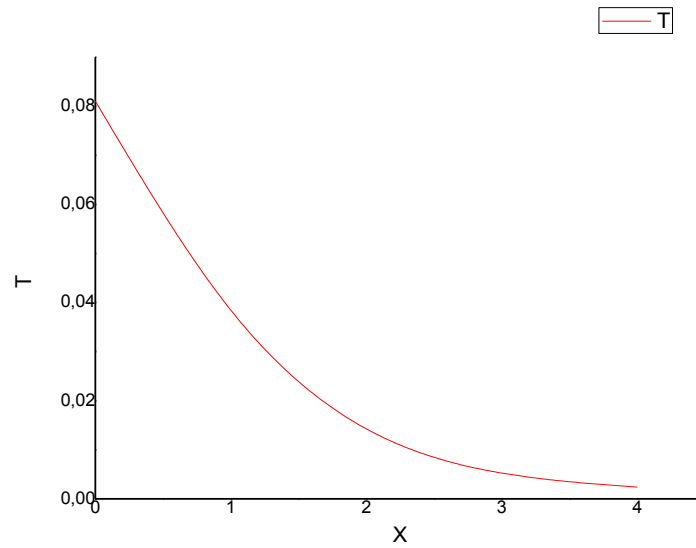


Figure III.2 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

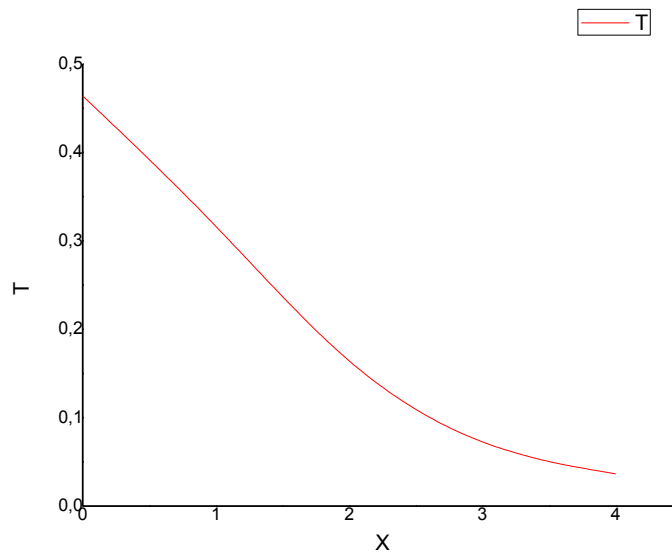


Figure III.3 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

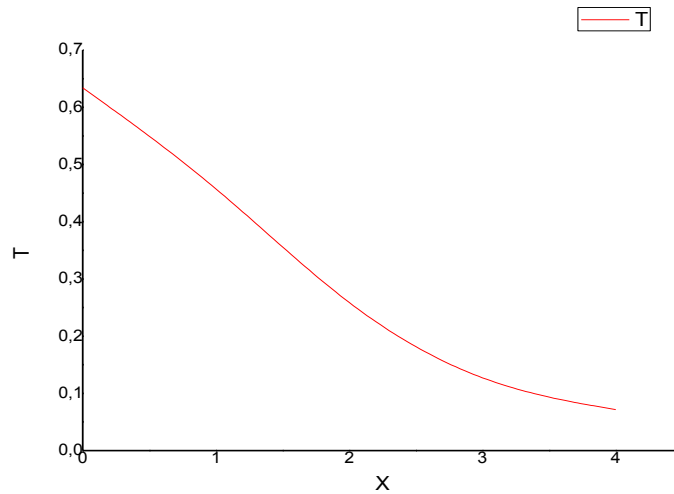


Figure III.4 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

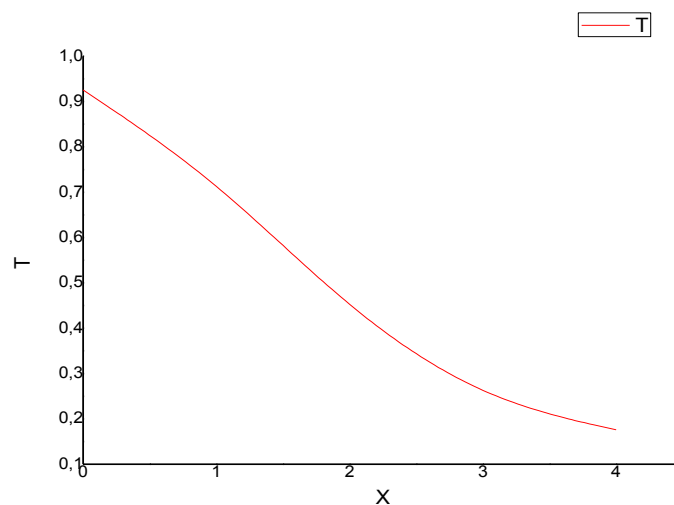


Figure III.5 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

Pour un Biot = 0, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10\dots\dots,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

Pour : $t= 0.10$ la température maximale $T = 0.08107$

$t= 0.80$ la température maximale $T = 0.46387$

$t= 1.2$ la température maximale $T = 0.63394$

$t= 2$ la température maximale $T = 0.92537$

Pour Biot=0.01

t = 0.10

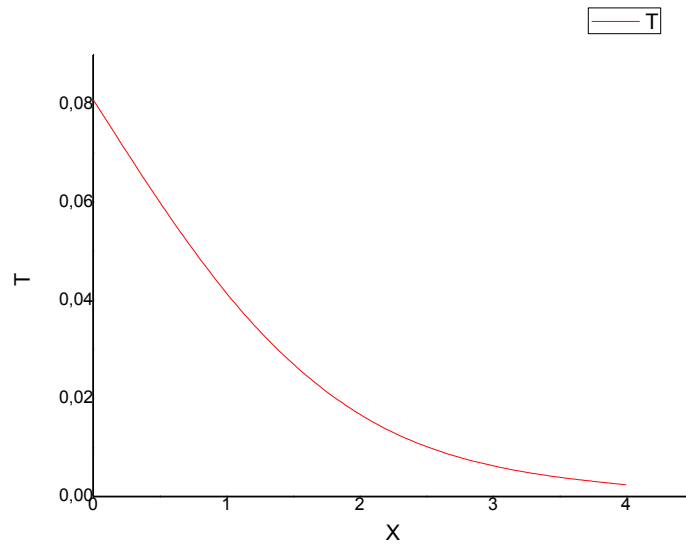


Figure III.6 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

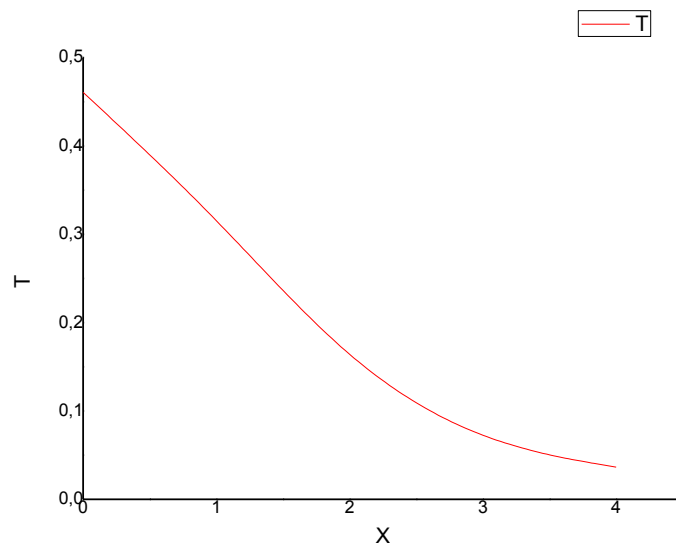


Figure III.7 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

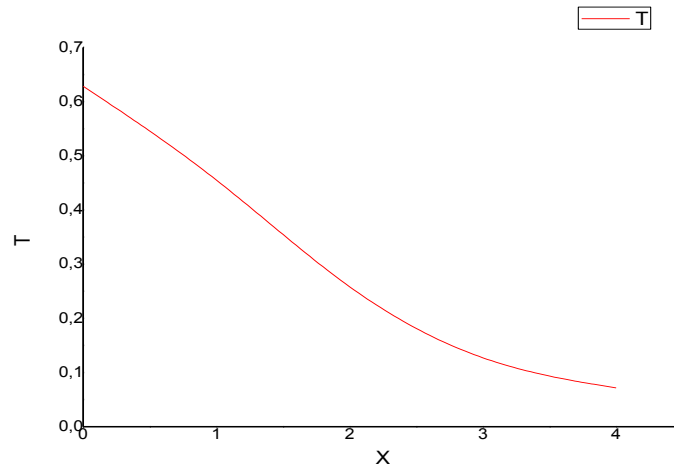


Figure III.8 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

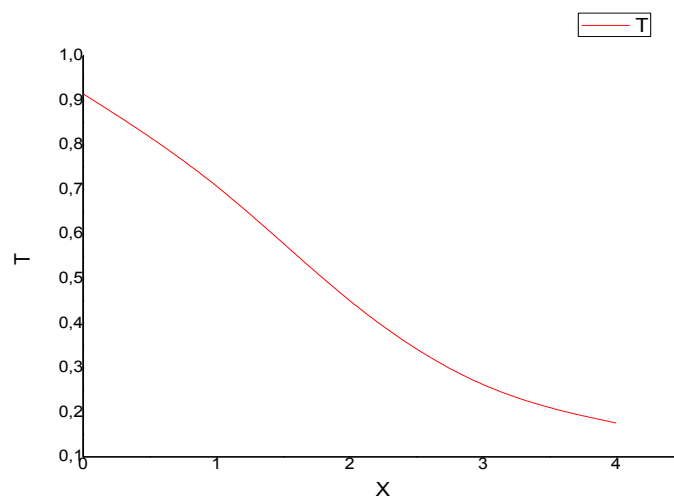


Figure III.9 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

Pour un Biot = 0.01, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10\dots\dots,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

Pour : $t= 0.10$ la température maximale $T = 0.08088$

$t= 0.80$ la température maximale $T = 0.46055$

$t= 1.2$ la température maximale $T = 0.62837$

$t= 2$ la température maximale $T = 0.91481$

Pour Biot=0.02

t =0.10

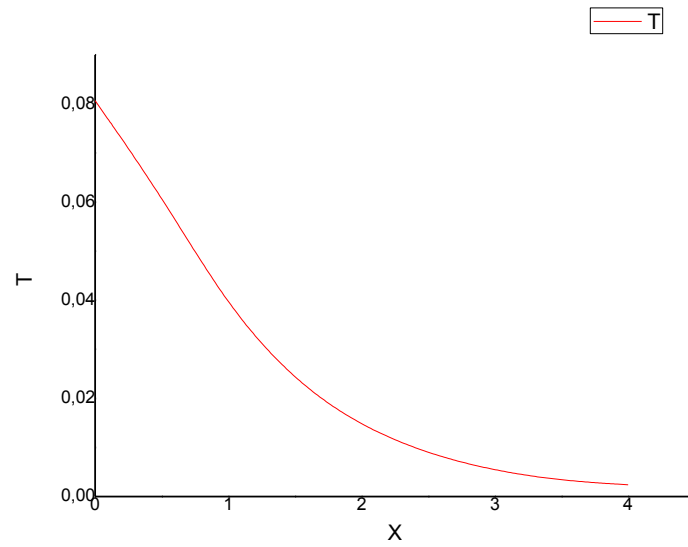


Figure III.10 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

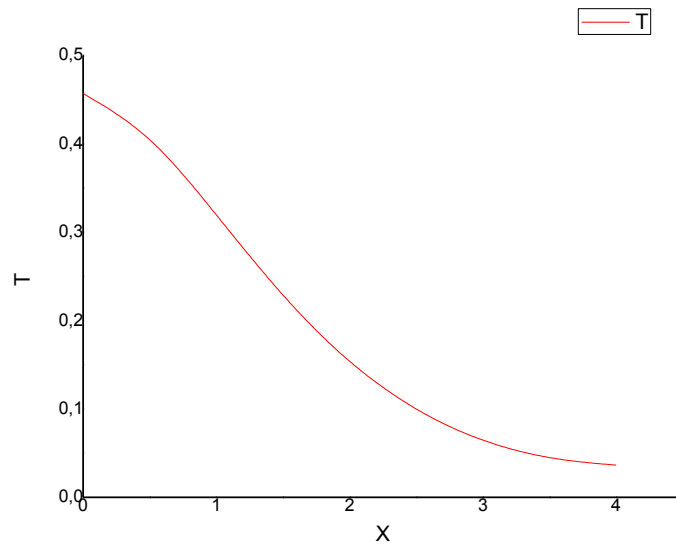


Figure III.11 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 1.2

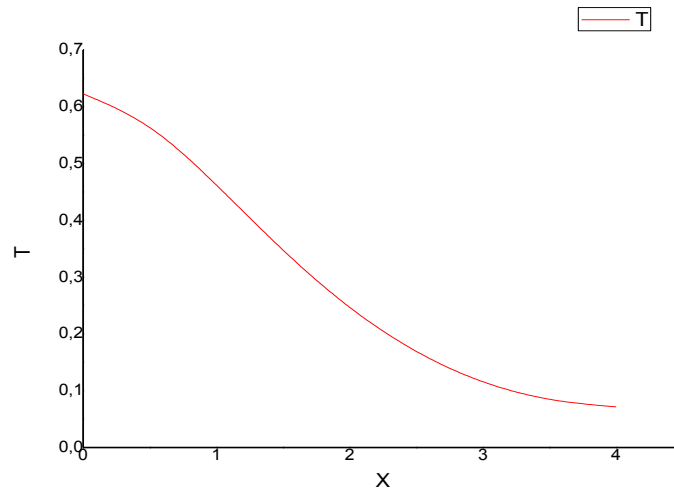


Figure III.12 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 2

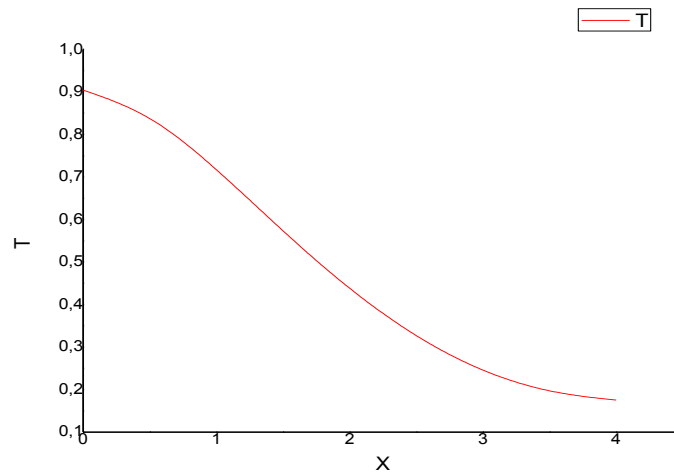


Figure III.13 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.02, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10\dots\dots,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour :
 $t= 0.10$ la température maximale $T = 0.08069$
 $t= 0.80$ la température maximale $T = 0.45728$
 $t= 1.2$ la température maximale $T = 0.62288$
 $t= 2$ la température maximale $T = 0.90445$

Pour Biot=0.03

t = 0.10

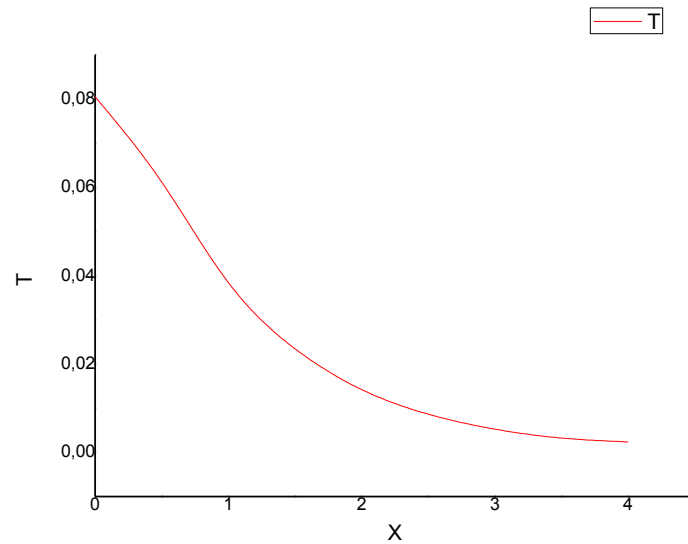


Figure III.14 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

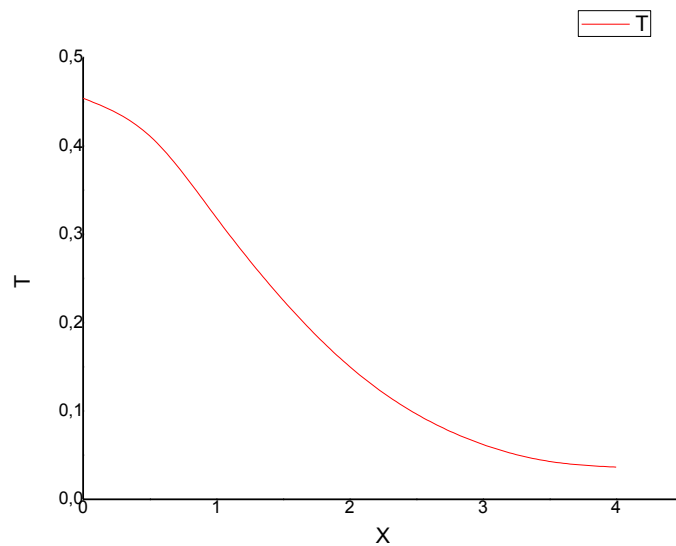


Figure III.15 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

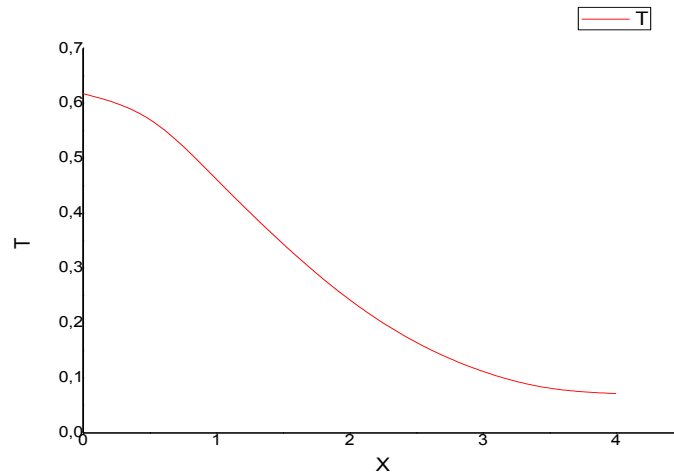


Figure III.16 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

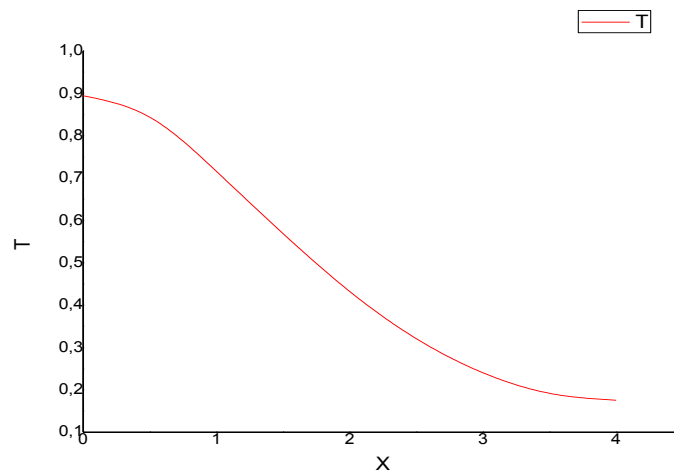


Figure III.17 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.03, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10.....,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour : $t= 0.10$ la température maximale $T = 0.08051$
 $t= 0.80$ la température maximale $T = 0.45405$
 $t= 1.2$ la température maximale $T = 0.61748$
 $t= 2$ la température maximale $T = 0.89429$

Pour Biot=0.04

t = 0.10

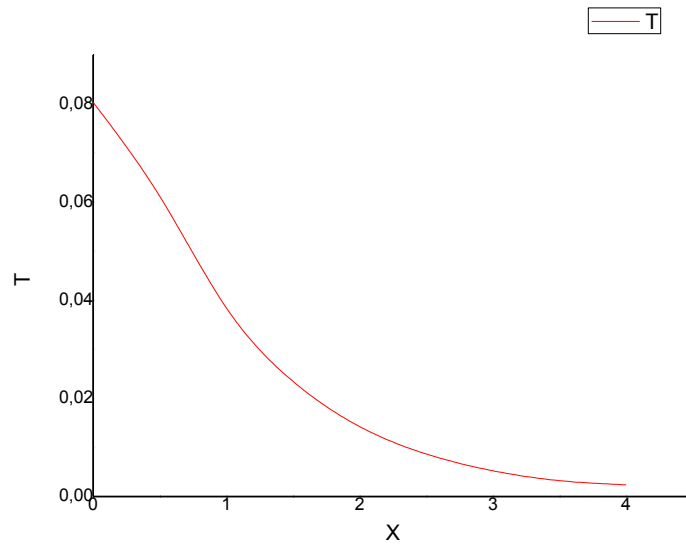


Figure III.18 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

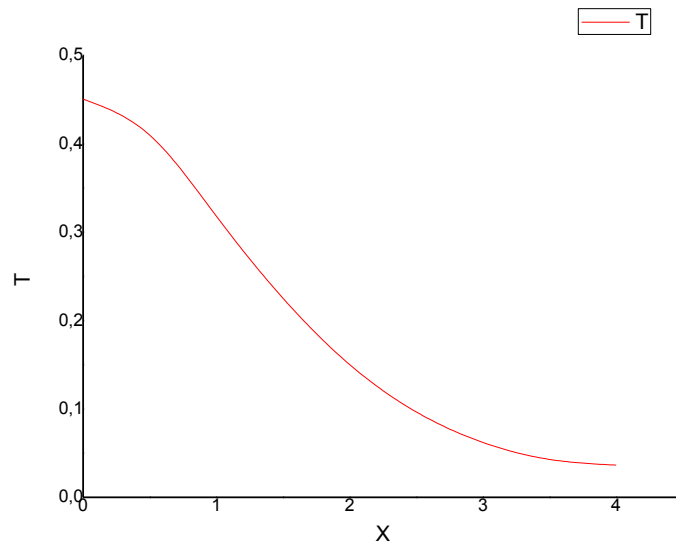


Figure III.19 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

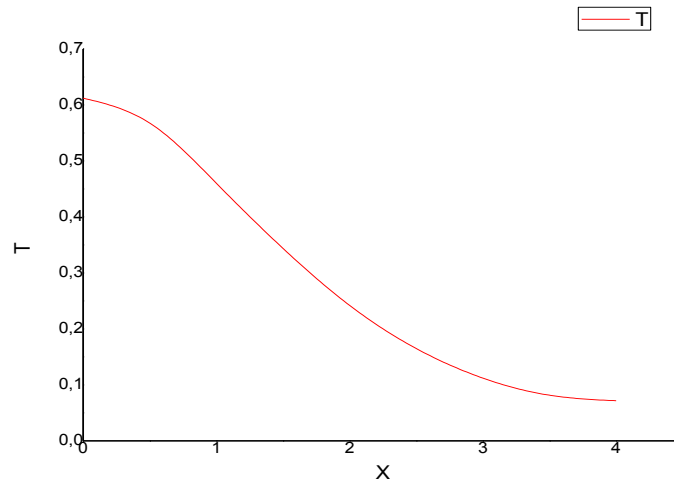


Figure III.20 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

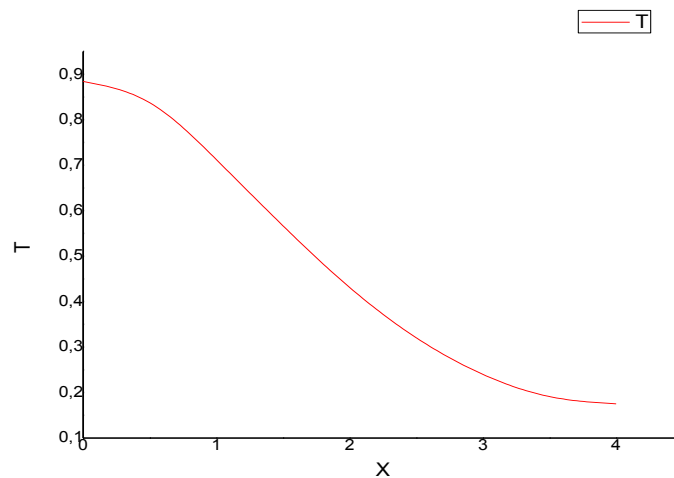


Figure III.21 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.04, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10\dots\dots,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour :
 $t = 0.10$ la température maximale $T = 0.08032$
 $t = 0.80$ la température maximale $T = 0.45086$
 $t = 1.2$ la température maximale $T = 0.61215$
 $t = 2$ la température maximale $T = 0.88433$

Pour Biot=0.05

t = 0.10

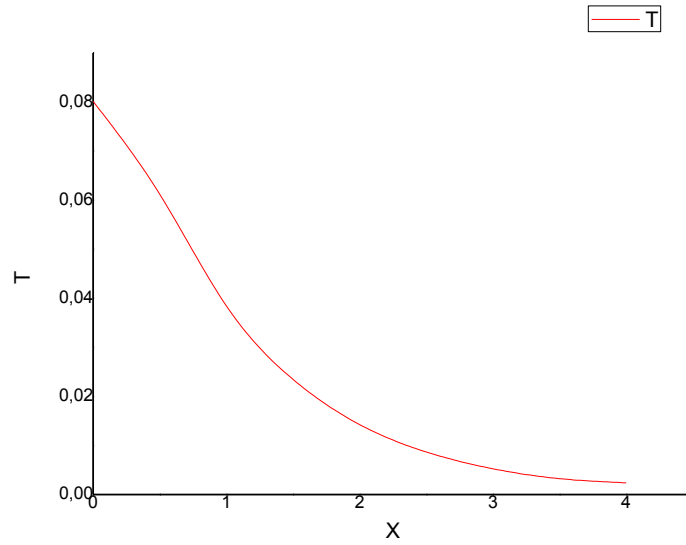


Figure III.22 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

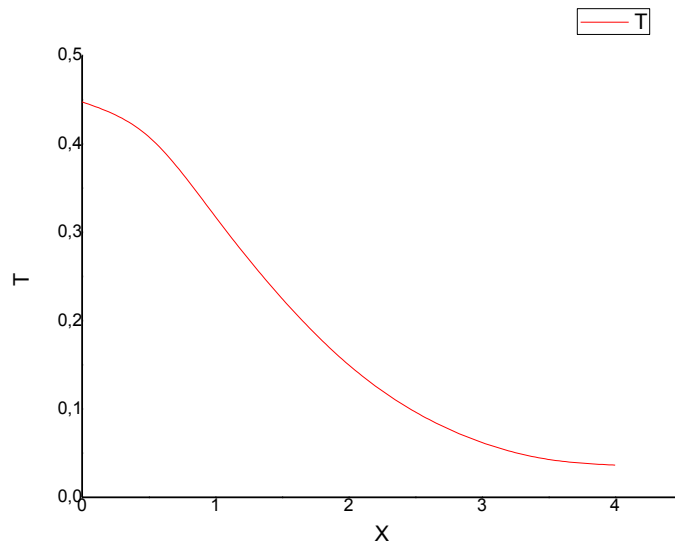


Figure III.23 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

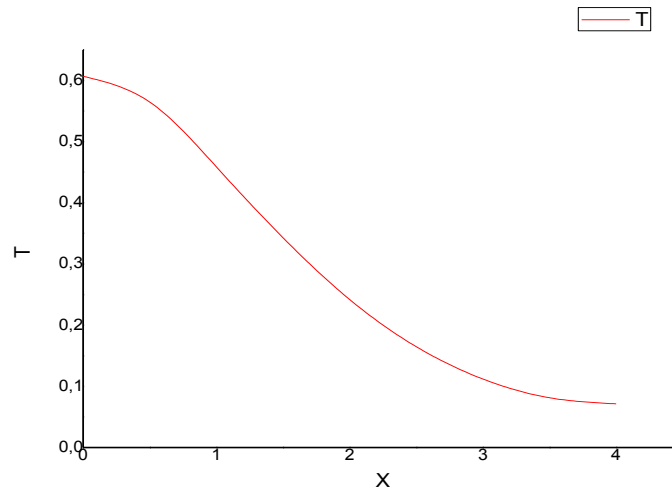


Figure III.24 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

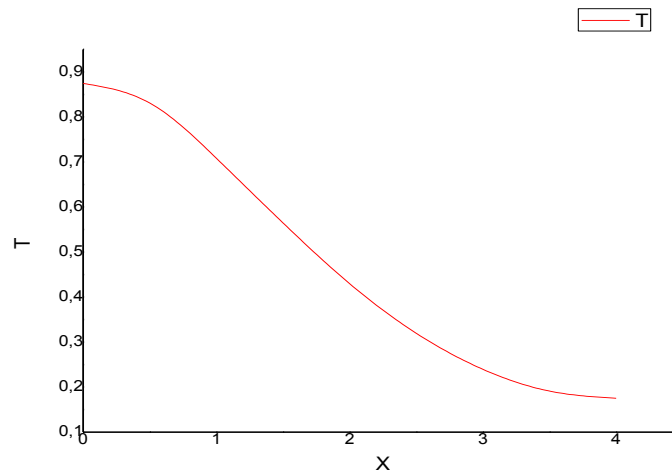


Figure III.25 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.05, la température maximale est de l'ordre $x=0$ (sur la surface du matériau), quelque soit le temps ($t=0.10.....,2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour :
 - $t = 0.10$ la température maximale $T = 0.08014$
 - $t = 0.80$ la température maximale $T = 0.44770$
 - $t = 1.2$ la température maximale $T = 0.60691$
 - $t = 2$ la température maximale $T = 0.87456$

Pour Biot = 0.06

t = 0.10

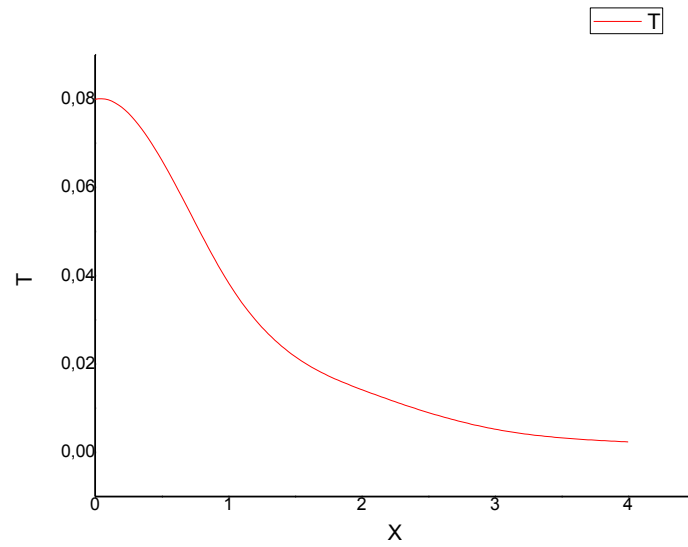


Figure III.26 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

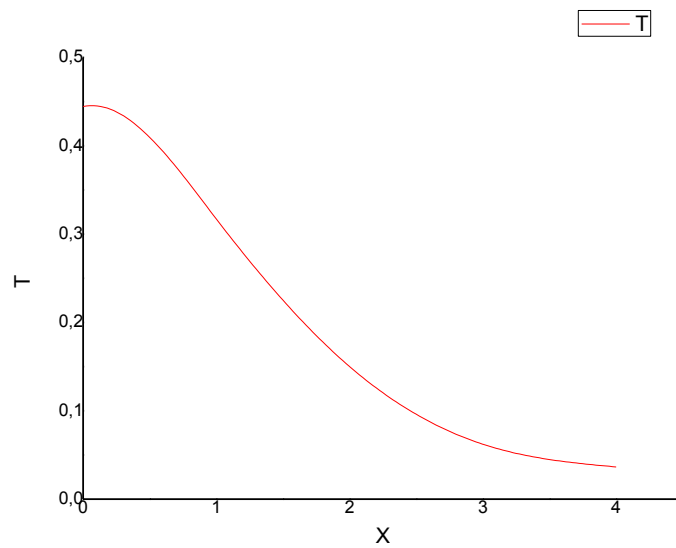


Figure III.27 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

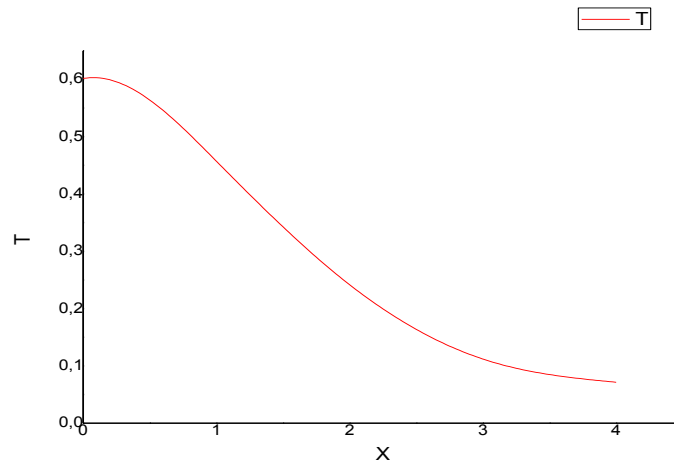


Figure III.28 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

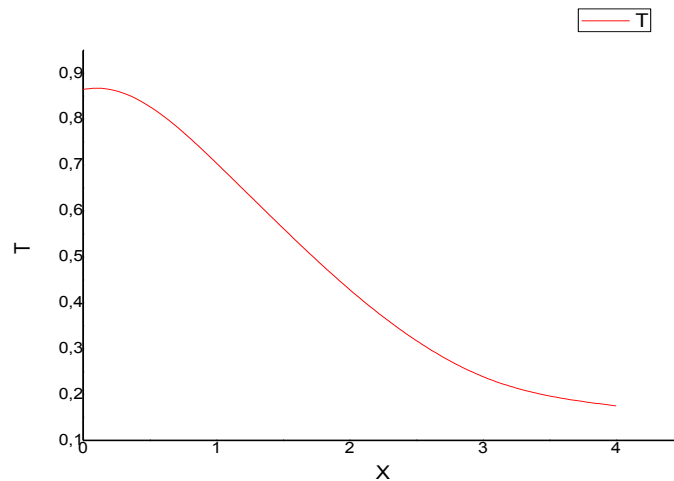


Figure III.29 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.06 la température maximale est à l'intérieure du matériau (à $x > 0$) quelque soit le temps ($t = 0.10, \dots, 2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour :
 - $t = 0.10$ la température maximale $T = 0.08003$
 - $t = 0.80$ la température maximale $T = 0.44548$
 - $t = 1.2$ la température maximale $T = 0.60315$
 - $t = 2$ la température maximale $T = 0.86745$

Pour Biot=0.1

t = 0.10

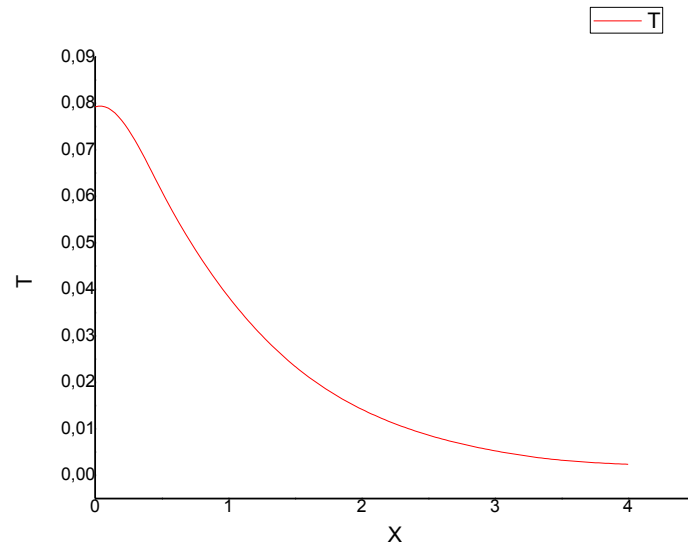


Figure III.30 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

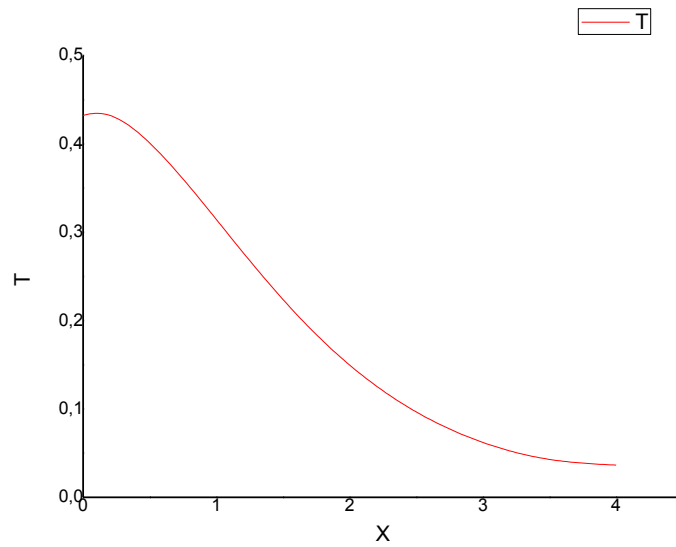


Figure III.31 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

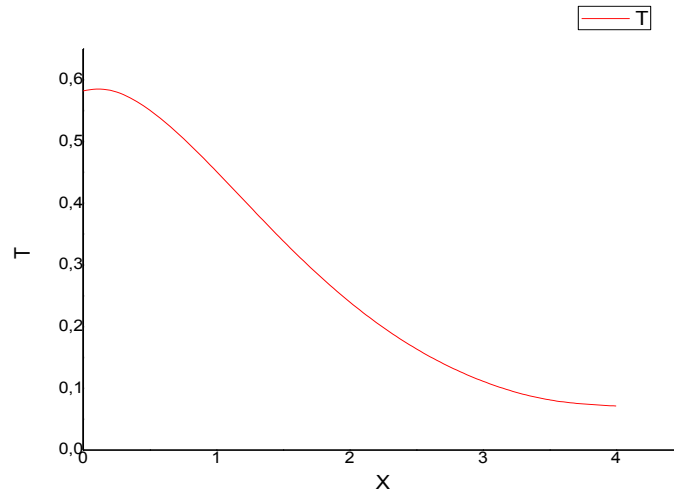


Figure III.32 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

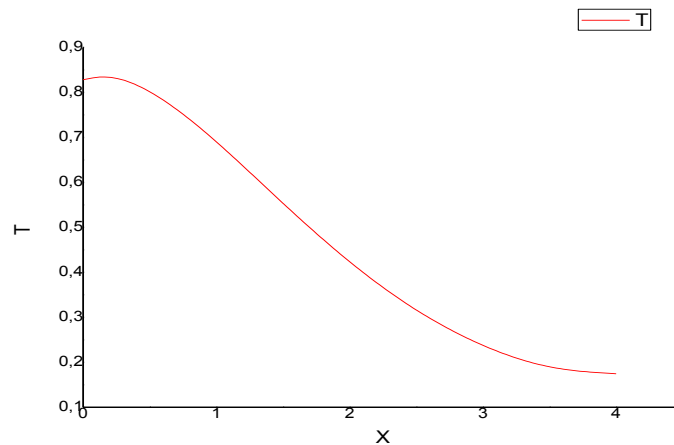


Figure III.33 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.1, la température maximale est à l'intérieur du matériau (à $x > 0$) quelque soit le temps ($t = 0.10, \dots, 2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour :
 - $t = 0.10$ la température maximale $T = 0.07938$
 - $t = 0.80$ la température maximale $T = 0.43457$
 - $t = 1.2$ la température maximale $T = 0.58511$
 - $t = 2$ la température maximale $T = 0.83424$

Pour Biot=0.2

t = 0.10

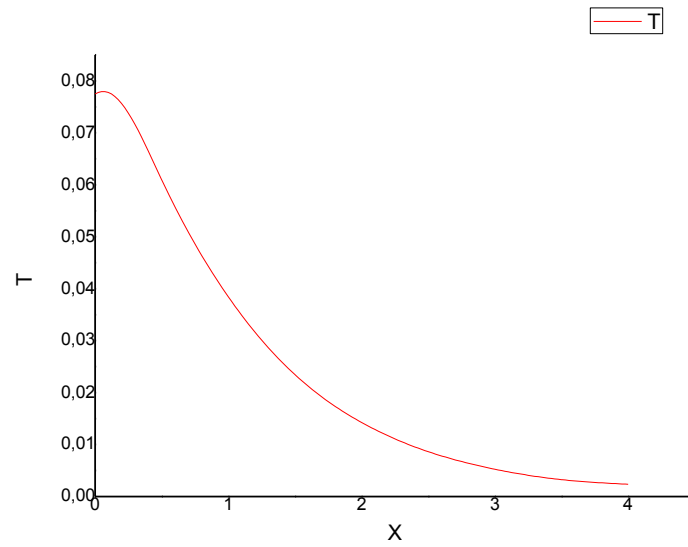


Figure III.34 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

t = 0.80

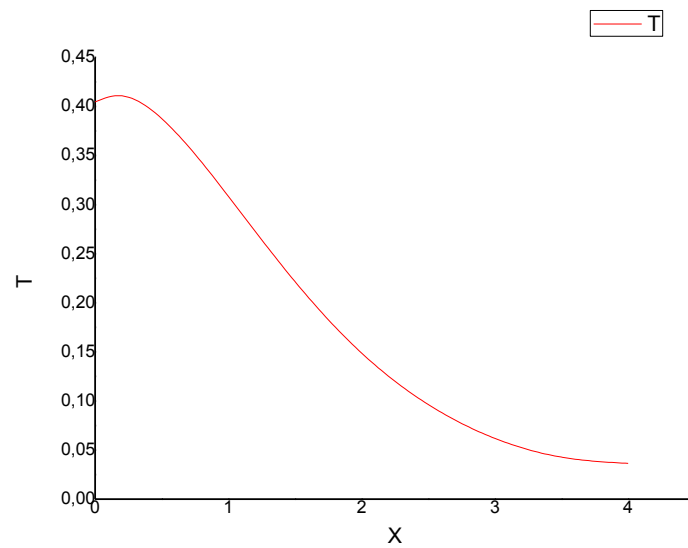


Figure III.35 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 1.2$

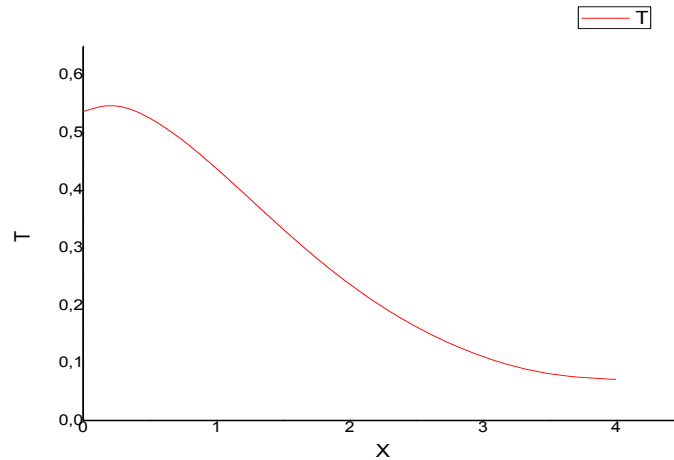


Figure III.36 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

$t = 2$

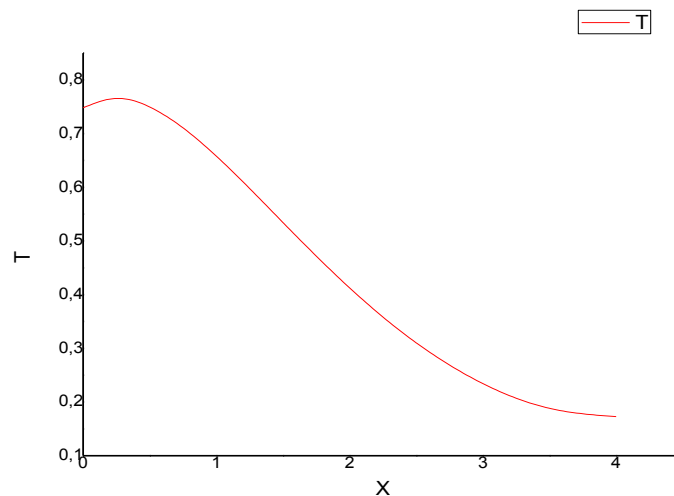


Figure III.37 : Profil de température en fonction du temps pour différentes positions x

- Pour un Biot = 0.2 la température maximale est à l'intérieure du matériau (à $x > 0$) quelque soit le temps ($t = 0.10, \dots, 2$).

Au fil du temps la température maximale augmente.

- Pour : $t = 0.10$ la température maximale $T = 0.07791$
- $t = 0.80$ la température maximale $T = 0.41108$
- $t = 1.2$ la température maximale $T = 0.54687$
- $t = 2$ la température maximale $T = 0.76563$

Pour un Biot ≤ 0.05 la température maximale est de l'ordre de $x = 0$ (sur la surface du matériau) quelque soit le temps.

Pour un Biot > 0.05 la température maximale est à l'intérieur du matériau (à $x > 0$) quelque soit le temps, ce qui engendre le problème de fissures thermiques.

- ❖ En s'appuyant sur les graphes étudiés précédemment sur le logiciel Maple nous avons confectionné des tableaux à partir desquels nous avons établis d'autres graphes qui sont des profils de températures en fonction du biot et de la longueur x .

Biot	T_{max}
0	0.92537
0.01	0.91481
0.02	0.90445
0.03	0.89429
0.04	0.88433
0.05	0.87456
0.06	0.86746
0.1	0.83424
0.2	0.76564

Tableau III.1 : Les valeurs de la température maximale et le biot.

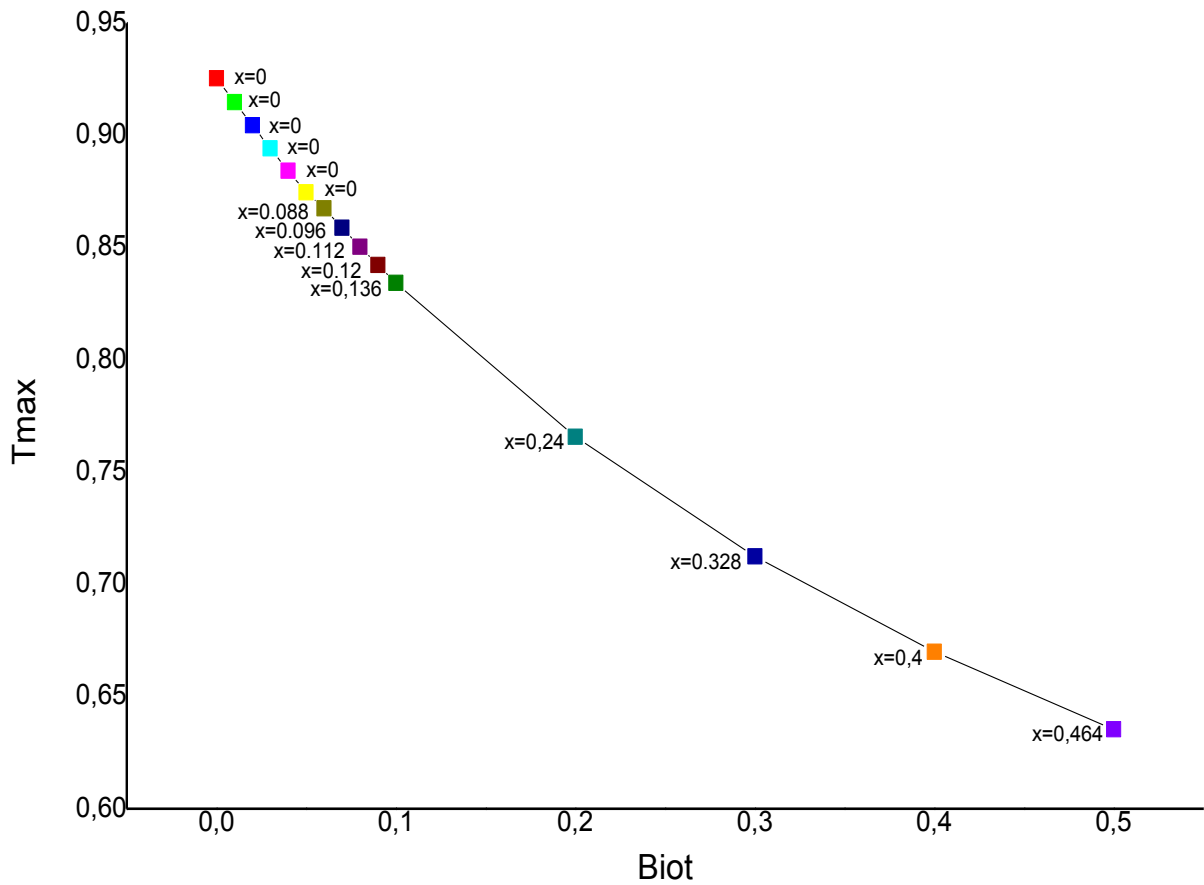


Figure III.38 Profile de température maximale en fonction de biot.

A chaque fois que le Biot augmente on constate que la température maximale diminue, la température maximale a un $Biot \leq 0.05$ est a la surface du matériau ($x=0$) contrairement à un $Biot > 0.05$ la température maximale est a l'intérieure du matériau ($x > 0$).

X	Tmax
0	0.92537
0	0.91481
0	0.90445
0	0.89429
0	0.88433
0	0.87456
0.088	0.86746
0.136	0.83424
0.24	0.76564

Tableau III.2 : les valeurs de la température maximale et de la longueur x

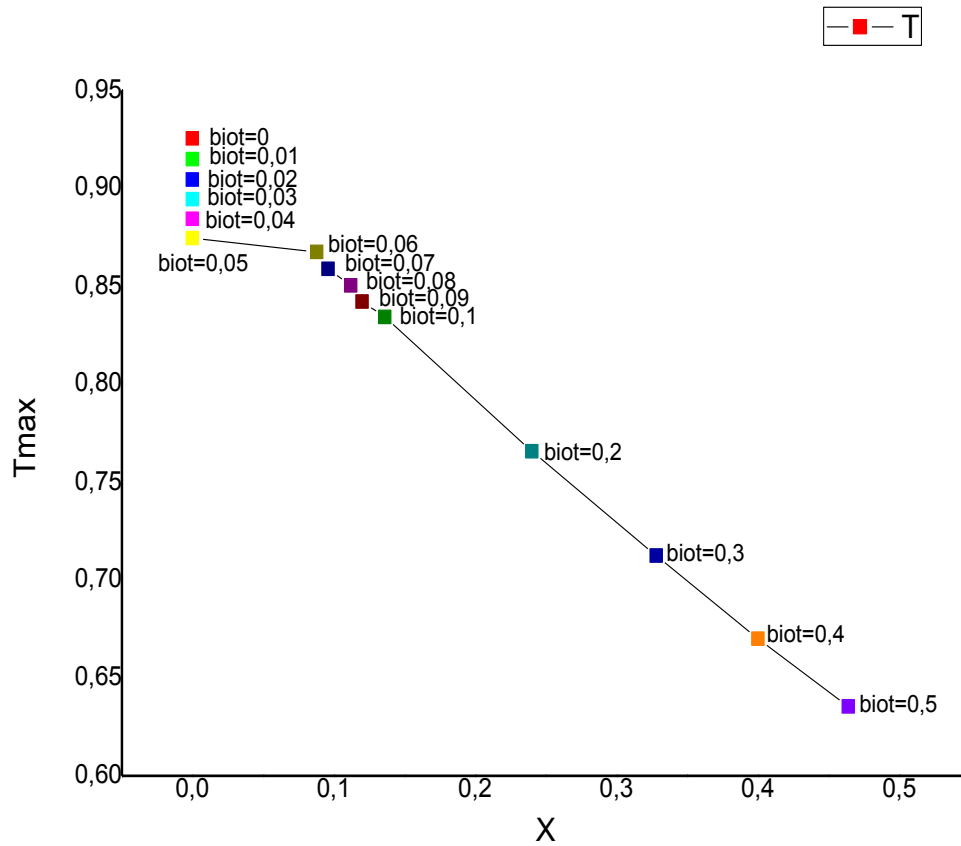


Figure III.39 Profile de température maximale en fonction De la longueur x

On observe que :

Pour un $Biot \leq 0.05$ la température maximale est de l'ordre de $x=0$ (sur la surface)

Pour un $Biot > 0.05$ la temperature maximale est à l'intérieure du matériau ($x > 0$) qui provoque au fil du temps la fusion à l'intérieure du matériau ce qui engendre des fissures thermique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude proposée est le traitement d'un substrat supposé comme un milieu semi infini, en réponse à la principale difficulté qui est les fissures thermiques superficielles lors du traitement thermique par laser, concernant l'adoption des conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes de l'interaction thermique laser-matériau, on a traité le problème de modélisation de trempe thermique par laser. Afin de réduire les coûts expérimentaux utilisés dans certains travaux.

Le modèle numérique qu'on a proposé permet de résoudre l'équation de la chaleur(Fourier) adimensionnelle unidirectionnelle sous l'effet du flux thermique laser imposé.

On a utilisé le logiciel maple avec la méthode des différences finis, qui sert mieux ce genre de problème.

Des résultats sont obtenus et discutés pour de nombre de Biot différents sous l'effet d'une source laser.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Histoire et principe de fonctionnement du MASER et du LASER, **Bernard Cagnac** Laboratoire Kastler Brossel, Paris IV Delphine **Chareyron** ENS de Lyon.
- [2] Pantelis D., «Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie », Techniques d'ingénieur, Vol. MD2, N° M1240,(1993).
- [3] LE LASER. I- Principe de fonctionnement du LASER, Marie-Paule Germain
- [4] Boutalbi, Nadir (2007). ETUDE DE SENSIBILITE AUX PARAMETRES EN PHASE SOLIDE LORS DU TRAITEMENT THERMIQUE PAR LASER. Mémoire de magistère. Centre Universitaire Yahia Fares de Médéa. Institut des Sciences et de la Technologie. Département de Génie Mécanique. Energétique. 120 p
- [5] C. Schwob. L. Julien. Le laser : principe de fonctionnement., Refl ets de la Physique n° 21 / Le Bup n° 927
- [6] Patricia LAURENS. et Catherine Dubouchet, Didier Kechemair « Application des lasers aux traitements de surface » Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M 1 643.
- [7] Ludovic AVRIL. Elaboration de revêtements sur acier inoxydable : simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique. Thèse de doctorat. L'école nationale supérieure d'art et métiers. Spécialité : Science des Matériaux et Génie des Procédés.257 p.
- [8] J. A Folkes, Surf. Coat. Techn., 63 (1994), p.65-71.
- [9] Terrat J. P., et Cartier M., «Comment poser un problème de traitement de surface », Techniques d'ingénieur ,Vol. AGC4 (Conception et Production) ou bien Vol. MD2 (Traitement des métaux) , N°. M1423,(Mars 2000) .
- [10] Fouquet F., «Corrosion et traitements laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.250-276
- [11] Barralis J. et Castex Louis, Maeder Gérard., «Précontrainte et traitements superficiels », Techniques d'ingénieur ,Vol. MD1, N°. M1180,(1999) .
- [12] Desalos Y. et Lestart F., «Traitements thermiques superficiels des acier », Techniques d'ingénieur, Vol. MD1, N°. M1205,(1996).

- [13] Pashby I.R. et S. Barnes, B.G. Bryden., « Surface hardening of steel using a high power diode laser », *Journal of Materials Processing Technology* ,Vol.139, (2003),pp. 585–588
- [14] Naqavi I.Z., «Conduction and non-conduction limited laser heating process mathematical simulation », thèse de master, king FAHD university of petroleum and minerals , Dhahran SAUDI ARABIA ,(November 2001),pp.169
- [15] Grégoire ALLAIRE,. Ecole Polytechnique MAP 431 11 juillet 2005 ANALYSE NUMERIQUE ET OPTIMISATION. Une introduction a la modélisation mathématique et a la simulation numérique
- [16] Dubois, G. (2018). *Modeling and Simulation*. Boca Raton: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781351241137>.
- [17]Caron-Guillemette, Gabriel (2013). Modélisation du procédé de trempe au laser appliqué à des composantes mécaniques complexes. Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Département de mathématiques, informatique et génie, 237 p.
- [18] Rapaz M., «Les données générales de la simulation dans le traitement laser »,dans : *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.375-401
- [19] Hoaldley. A. et Drezet J.M., <<Modélisation thermique de la refusions et du revêtement de surface par laser>>,dans : *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, Ecole de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991), pp.568-589
- [00] *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons. Page 83
- [21] Blackwell B.F .,« Temperature profile in semi-infinite body with exponential source and convective boundary condition », *ASME J. Heat Transfer*, Vol.112 ,(1990),p. 567-571
- [22] Dabby. F.W et Paek. U.,« High-intensity laser-induced vaporization and explosion of solid materials », *IEEE J. Quantum Electron*, vol. QE-8, N02, (fubruary1972),pp. 106-111
- [23] Zubair. S. M et Chaudhry. M.A.,« Heat conduction in a semi-infinite solid when subjected to spatially decaying instantaneous laser source », *Wfirme- undStofffibertragung* Vol.28, (1993),pp. 425-431

- [24] Zubair. S. M et Chaudhry. M.A.,« Conduction of heat in a semi-infinite solid with an exponential-type initial temperature profile: temperature and heat flux solutions due to an instantaneous laser source », *Wfirme- undStofffibertragung* , Vol. 30, (1994),pp. 41-46
- [25] Yilbas. S.B. et Sami M., «Convergence of time exponential decaying pulse to intensity step input pulse for laser heating of semi-infinite body »,*Int. Comm. Heat Mass Transfer*. Vol. 24, No. 6, (1997), pp. 785 -791
- [26] Yilbas. S. B. et Kalyon. M., « Analytical solution for pulsed laser heating process: convective boundary condition case », *International Journal of Heat and Mass Transfer* ,Vol.45 ,(2002),pp. 1571–1582
- [27] Kalyon. M. et Yilbas. S. B., « Exact solution for time exponentially varying pulsed laser heating: convective boundary condition case», *Proc Instn Mech Engrs* ,Vol. 215 Part C ,(2001),pp. 591–606
- [28] Yilbas. B.S et Kalyon. M.,«Repetitive laser pulse heating with a convective boundary condition at the surface», *J. Phys. D: Appl. Phys*, 34 (2001),pp. 222–231
- [29] Rachid Fakir. Et Nouredine Barka. Jean Brousseau.Gabriel Caron-Guillemette., « Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4340 Steel Cylindrical Specimens Heat Treated with Fiber Laser », *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 55, pp. 41-56, 2020.
- [30] Cheung N. et MA pinto. MCF lerardi. A Garcia.,« Mathematical Modeling and Experimental Analysis of the Hardened Zone in Laser Treatment of a 1045 AISI Steel », *Mathematical Research*,Vol. 7, No. 2, (2004),pp. 349-354
- [31] Shuja S.Z et Yilbas. B.S.,« Pulsative heating of surfaces », *International Journal of Heat and Mass Transfer* ,Vol.41,(1998),pp.3899-3918
- [32] Rozniakowska. M. et Yevtushenko A. A.,« Influence of laser pulse shape both on temperature profile and hardened layer depth », *Heat Mass Transfer* ,Vol. 42 ,(2005),pp.64–70
- [33] Sun, Z., Guo, W., & Li, L. (2020). Numerical modelling of heat transfer, mass transport and microstructure formation in a high deposition rate laser directed energy deposition process. *Additive Manufacturing*, 101175. doi:10.1016/j.addma.2020.101175
- [34] Bessrou. J et Mahmoud Bouhafs. Ridha khadrani. Mouhamed jemmali., « Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source laser mobile » *Int.J of thermal science*, 41 (2002),pp.1055-1066

- [35] Fakir, R., Barka, N., & Brousseau, J. (2018). Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 11, 15–25
- [36] Babu, P. D., Buvanashakaran, G., & Balasubramanian, K. (2013). Numerical analysis and experimental validation of hardness and microstructural changes during laser transformation hardening of low alloy steel plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 228(3), 217–230.
- [37] Tani, G., Orazi, L., Fortunato, A., Campana, G., & Cuccolini, G. (2007). Laser hardening process simulation for mechanical parts. *High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications*.
- [38] C. Drenth, "Comprendre et prévenir la chaleur Vérifier la fissuration sur les tiges de forage", sur <https://www.boartlongyear.com/fr/insite/understanding-and-preventing-heat-check-cracking-on-drill-rods/#:~:text=La%20fissuration%20thermique%20est%20le,et%20de%20refroidissement%20par%20friction.>
- [39] TELIB Kenza (2013). Etude de la soudure au Laser aux limites des températures de fusion des métaux. Mémoire de master académique. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA .Département des Sciences de la Matière. Spécialité : Rayonnement et Spectroscopie et Optoélectronique. 67 p.

Résumé :

Durant le traitement thermique superficiel par laser d'un matériau semi-infini, un phénomène qui est la fusion à l'intérieure du matériau qui engendre des fissures thermiques superficiels après l'injection du gaz de protection pour éviter l'oxydation. Une analyse mathématique a été effectuée, la modélisation de trempe thermique par laser est réalisée sous un logiciel qui sert mieux ce genre de problème avec la méthode des différences finies pour résoudre une équation de chaleur unidirectionnelle adimensionnelle d'un conducteur semi infini qui nous a permet de définir un nombre de Biot caractéristique.

Mots clés : laser – modélisation – interaction laser-matière – gaz de protection – fissure thermique – différence finies – trempe au laser.

Abstract :

During the superficial heat treatment by laser of a semi-infinite material, a phenomenon has been observed which is the melting inside the studied material which generates superficial thermal cracks after the injection of the protection gas to avoid oxidation. A mathematical analysis of this problem has been carried out, the laser thermal quenching modelling is carried out under a software which better serves this kind of problem with the finite difference method to solve a unidirectional dimensionless heat equation of a semi infinite conductor which has allowed us to define a Biot number characteristic.