

---

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : INSTALLATION ÉNERGÉTIQUE ET TURBOMACHINES

PAR :

**BOUFADENE JUGURTA**

**AMIROUCHE RABAH**

## Thème

---

**Modélisation de la trempe superficielle de l'acier par laser Co<sub>2</sub>**

---

Soutenu le 12 Octobre 2021 devant le jury composé de:

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

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020-2021

---

# REMERCIEMENTS

---

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a offert pour aboutir à la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères et profonds remerciements pour notre enseignant et notre encadreur Monsieur BOUTALBIN pour son soutien, ses conseils, suggestions et encouragements qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

Nos respectueuses salutations et remerciements aux membres du jury qui auront l'honneur d'apprécier et de juger ce travail.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire.

# **DEDICACES**

---

## DEDICACES

Je dédie ce travail :

A ma chère mère pour son amour, son encouragement et ses sacrifices.

A mon cher père pour son soutien son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A mes chères sœurs.

A tous les membres de ma famille, mon grand-père, ma grand-mère ainsi que mes tentes.

Atout mes amis, Amazigh, Khoulayli, Juba, baarourou...ect

Ma copine Elicia

Et tous ceux qui m'aiment.

*Jugurta*

---

## DEDICACES

Je dédie ce travail :

A ma chère mère pour son amour, son encouragement et ses sacrifices.

A mon cher père pour son soutien son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A mes chères sœurs et mon frère Azzeddine pour son aide.

A tous les membres de ma famille, ma grand-mère

Atout mes amis, Fateh ,Amazigh, Khoulayli, ....ect

Et tous ceux qui m'aiment.

*Rabah*

---

---

# Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>ii</b>
<b>Tables des matières</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>ix</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>x</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>I. Généralités sur les lasers</b> .....	<b>2</b>
I.1 Introduction .....	2
I.2 Historique .....	3
I.3 Principes de fonctionnement .....	4
I.4 Types de laser .....	4
I.4.1 Lasers à solide .....	4
I.4.2 Lasers à liquide .....	5
I.4.3 Lasers à gaz .....	6
I.4.4 Les lasers à ions .....	6
I.4.5 Lasers chimiques .....	6
I.5 Domaines d'application des lasers dans l'industrie .....	7
I.6 Interaction lasers matériaux .....	7
I.7 Les lasers les plus utilisés dans l'industrie .....	9
I.8 Les avantages des lasers .....	10
I.9 Traitements thermiques des matériaux .....	10
I.9.1 Introduction .....	10
I.9.2 Procédés des traitements thermiques .....	11
I.9.3 Les sources énergétiques de traitement thermique .....	12
I.9.4 Transfert thermique entre les sources classiques et le laser .....	12
I.10 Traitement thermique superficiel par laser .....	13
I.10.1 Trempe superficielle au laser .....	14
I.10.2 Fusion superficielle .....	14
I.10.3 Traitement avec vaporisation .....	15

---

I.11	Place et enjeux de traitement thermique superficiel de l'acier par laser .....	16
I.12	Cycle de traitement thermique superficiel au laser .....	16
I.13	Diagramme fer-carbone .....	17
I.14	Conclusion .....	20
II.	Modélisation Mathématique et Simulation du Problème de traitement thermique de superficiel de l'acier par laser .....	21
II.1	Introduction .....	21
II.2	Définition de la modélisation .....	21
II.2.1	Etape de modélisation .....	21
II.2.2	Les objectifs de la modélisation .....	22
II.3	Définition de la simulation .....	22
II.3.1	Méthodes de simulation .....	22
II.3.2	Les objectifs de la simulation .....	22
II.4	Conditions aux limites spatiales et temporelles .....	23
II.4.1	Conditions initiales .....	23
II.4.2	Conditions aux limites .....	23
II.5	Analyse de modèle d'A.M DEUS et VILAR .....	24
II.5.1	Descriptions .....	24
II.5.2	Hypothèse simplificatrice .....	24
II.5.3	Formulation des équations .....	25
II.5.3.1	Équations de départ .....	25
II.5.3.2	Condition aux limites et initiales .....	25
II.5.3.3	Résultat de model : .....	25
II.6	Gaz environnant .....	27
II.7	Modèles Mathématique la trempe au laser .....	27
II.7.1	Modèles analytiques .....	27
II.7.2	Modèles de simulation .....	28
II.7.3	Modèles numériques .....	29
II.8	Conclusion .....	29
III.	Modélisation mathématiques .....	30
III.1	Introduction .....	30
III.2	Description du modèle .....	30
III.3	Hypothèses simplificatrice .....	31
III.4	Formulation des équations .....	31

---

---

III.4.1.1	Equation de base .....	31
III.4.1.2	Conditions initiales et aux limites .....	32
III.5	Description de la méthode de résolution (pdepe) .....	32
III.6	Résultats et discussion .....	34
III.6.1	Equation de l'absorptivité pour l'acier sans le coefficient de convection.....	34
III.6.1.1	Pour la source laser CO <sub>2</sub> constante .....	34
III.6.1.2	Pour la source laser CO <sub>2</sub> Type exponentiel .....	36
III.6.2	Equation de l'absorptivité pour l'acier avec le coefficient de convection .....	38
III.6.2.1	Pour la source laser CO <sub>2</sub> constante .....	38
III.6.2.2	Pour la source laser Co <sub>2</sub> Type exponentielle .....	40
III.7	Estimation de la profondeur traitée .....	42
III.8	L'équation de la phase de refroidissement .....	43
III.8.1	Les conditions initiales et aux limites sont modélisées comme suit .....	43
III.9	Conclusion .....	44
<b>Bibliographie</b>	.....	<b>46</b>
<b>Résumé</b>	.....	<b>48</b>

---

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1:</b> Représentation mathématiques d'un oscillateur laser .....	2
<b>Figure I.2:</b> le laser de Maiman .....	3
<b>Figure I.3 :</b> Les lasers YAG dopés au néodyme sont toujours utilisés pour le micro usinage..	5
<b>Figure I.4 :</b> Schéma de principe d'un laser au dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ).....	6
<b>Figure I.5 :</b> domaine d'application du laser dans l'industrie .....	7
<b>Figure I.6 :</b> Schéma représentant les applications possibles du laser en fonction de la puissance et du temps d'interaction .....	8
<b>Figure I.7 :</b> Procédé de traitement thermique.....	11
<b>Figure I.8:</b> Profil de dureté à travers la profondeur pour les méthodes de trempe au laser et de trempe par induction .....	13
<b>Figure I.9:</b> Fusion superficielle par irradiation laser.....	15
<b>Figure I.10:</b> durcissement surface au laser.....	17
<b>Figure I.11:</b> Schémas du diagramme d'équilibre Fe-Fe <sub>3</sub> .....	19
<b>Figure II.1 :</b> Exemples de conditions aux limites .....	24
<b>Figure II.2 :</b> Résultats pour le cuivre.....	26
<b>Figure II.3 :</b> Résultats pour l'aluminium .....	26
<b>Figure III.1 :</b> Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser .....	30
<b>Figure III.2 :</b> Profil de l'absorptivité de l'acier au laser CO <sub>2</sub> .....	31
<b>Figure III.3 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à A = cst et (T), pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO <sub>2</sub> .....	35
<b>Figure III.4 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à A = cst et (T), pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO <sub>2</sub> .....	35

---

<b>Figure III.5 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ sans coefficient de convection .....	37
<b>Figure III.6:</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ .....	37
<b>Figure III.7 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ .....	39
<b>Figure III.8 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ .....	39
<b>Figure III.9 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ avec coefficient de convection .....	41
<b>Figure III.10 :</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser $\text{CO}_2$ .....	41

---

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'industrie ....	10
<b>Tableau I.2</b> : Comparaison entre trempe au chalumeau, trempe par induction et trempe au laser .....	16
<b>Tableau III-1</b> : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs .....	36
<b>Tableau III-2</b> : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs .....	38
<b>Tableau III-3</b> : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs .....	40
<b>Tableau III-4</b> : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs .....	42

# NOMENCLATURE

Symbole	Définitions	Unité (SI)
$C_p$	Densité constante	J/Kg K
H	Coefficient de convection thermique	$W m^{-2} K^{-1}$
$I_0$	Puissance de la source laser	$W/m^2$
K	Conductivité thermique	W/m K
$q'$	Source interne générée par la source laser	$W/m^3$
R	Réfectivité de surface	-
T	Temps	s
$T(x,t)$	Température	$^{\circ}C$
X	Distance	m

Symboles grecs	Définition	Unité (SI)
$\beta$	Paramètres de la pulsation de la source laser	$S^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$Kg/m^3$
$\alpha$	Diffusion thermique	$m^2/s$

# **INTRODUCTION GENERALE**

### **INTRODUCTION GENERALE**

Le laser est la source de lumière qui a révolutionné la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, par sa cohérence, sa directivité et sa haute densité d'énergie. Cette source de lumière met à profit les propriétés de l'interaction de la matière avec un champ électromagnétique.

Aujourd'hui, le terme laser est entré dans le langage courant, puisque, grâce à ses caractéristiques particulières, ce rayonnement est exploité dans de très nombreuses applications. Dans nos salons et nos bureaux, il permet la lecture optique des supports de stockage élevé de données tels que les CD et DVD. Dans les centres médicaux, il est utilisé pour l'ablation de tissus, la rectification de défauts visuels tels que la myopie, le durcissement des amalgames dentaires, etc... Dans l'industrie, il permet le découpage de métaux, le nettoyage non destructif et non chimique de surfaces et bien d'autres applications. Le rayonnement laser est également utilisé comme outil d'alignement pour effectuer des mesures précises sur de grandes distances sur les chantiers de construction, pour la recherche spatiale ou fondamentale. Au niveau militaire, les lasers sont développés pour le guidage des missiles, la détection, voir comme arme directe. etc....

Le premier chapitre c'est une généralité sur les lasers qui contiennent une généralité historique sur les lasers, leur principe de fonctionnements, leurs caractéristiques, leur type et mode de fonctionnement, et leurs applications d'usinage, le traitement thermique et en fin la trempe superficiel.

Le second chapitre est consacrer à la recherche bibliographique qui contient une généralité sur la modélisation et la simulation de la trempe au laser, les conditions aux limites spatiales et temporelles, et en fin l'Analyse de modèle d'A.M DEUS et VILAR.

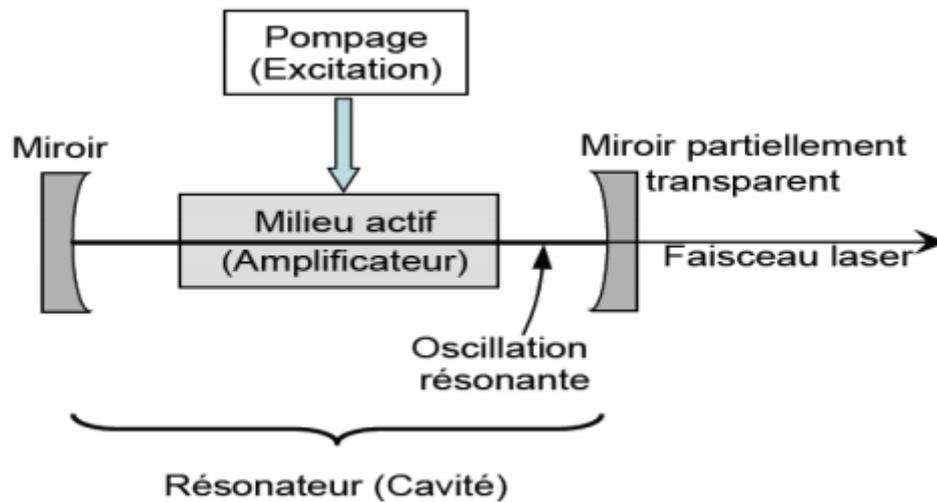
Le troisième et le dernier chapitre 'Modélisation Mathématique' contient description générale sur le modèle, hypothèses simplificatrice, l'équation de base, les conditions initiales et aux limites, et enfin la résolution du modèle par la méthode pdepe sous le logicielle Matlab.

# **Chapitre I : Généralités sur les lasers**

## I. Généralités sur les lasers

### I.1 Introduction

Le mot LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou Amplification de la Lumière par Emission stimulée de Radiation. C'est un dispositif qui produit un rayonnement cohérent pour des longueurs d'ondes situées dans les domaines infrarouge, visible, ultraviolet du spectre électromagnétique. Ces dispositifs emploient une variété extraordinaire de matériaux et de méthode d'amplification et des applications potentiels, quatre ingrédients sont nécessaires pour réaliser un laser. Schématisé dans la figure I.1. [1]



**Figure I.1:** Représentation mathématiques d'un oscillateur laser [1]

Un système laser comporte quatre principales composantes :

- **Le milieu actif du laser** : il est composé des atomes que l'on va venir exciter (ou pomper). Ce milieu peut être solide, liquide ou gazeux.
- **Une source de pompage**: elle permet d'exciter les atomes du milieu actif en injectant de l'énergie. Cette source peut être d'origine électrique ou lumineuse (un autre laser par ex).
- **Un miroir** : qui réfléchit tous les photons incidents.
- **Un miroir semi-réfléchissant** : qui laisse passer entre 1% et 10% des photons incidents et réfléchit le reste du rayonnement.

### I.2 Historique

Le principe de l'émission stimulée (ou émission induite) est décrit dès 1917 par Albert Einstein. Mais ce n'est qu'en 1954 que le premier maser (maser au gaz ammoniac) est conçu par J.P. Gordon, H.J. Zeiger et Ch.H. Townes. Au cours des six années suivantes, de nombreux scientifiques tels N.G. Bassov, A.M. Prokhorov, A.L. Schawlow et Ch.H. Townes ainsi qu'en France le prix Nobel Alfred Kastler et Jean Brossel contribuent à adapter ces théories aux longueurs d'ondes du visible.

En 1960, le physicien américain Théodore Maiman obtint pour la première fois une émission laser au moyen d'un cristal de rubis. Un an plus tard Ali Javan mit au point un laser au gaz (hélium et néon) puis en 1966, Peter Sorokin construisit le premier laser à colorant. Ironie de l'histoire, Townes, Bassov, Schawlow et Prokhorov reçurent un prix Nobel en 1964 pour leurs travaux en commun alors que Maiman, le véritable inventeur du laser, ne reçut aucun prix, car il ne travaillait pas dans un milieu académique. [2]



**Figure I.2:** le laser de Maiman [2]

Il est intéressant de noter que tous les ingrédients nécessaires à la fabrication d'un laser he-Ne existaient déjà à la fin du XVIIIème siècle, mais la théorie manquait !

XVII siècle : pompe à vide, production d'électricité.

1868 : découverte de l'hélium par l'astronome français Jules Janssen.

1890 : Premiers résonateurs optiques (interféromètre de Fabry et Pérot).

1898 : découverte du néon par W. Ransay et W. Travers.

1917 : Postulat de l'émission stimulée par Einstein.

### I.3 Principes de fonctionnement

Un système laser comporte trois principales composantes qui sont les suivantes : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique.

L'inversion de population favorise le processus d'émission stimulée. De cette manière, un photon se propageant dans le milieu actif a plus de chance de provoquer la désexcitation d'un atome excité que de se faire absorber par un atome au niveau inférieur. Il y a alors plus de photons produits par émission stimulée que de photons perdus dans différents processus d'absorption. Une réaction en chaîne peut alors se produire, entraînant une multiplication des photons dans le milieu actif. L'inversion de population contribue ainsi à l'amplification de la lumière dans le laser. Cependant, ce processus n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, qui peut aussi être appelé cavité résonante. Le résonateur est constitué de deux miroirs parallèles entre lesquels est placé le milieu actif. Le premier miroir, le réflecteur, est totalement réfléchissant alors que le second, le coupleur, est semi-transparent. Il permet ainsi à la lumière de sortir de la cavité. Le résonateur contribue en grande partie à l'amplification de la lumière dans le laser. Les photons, en étant réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. Lorsque le processus d'amplification se produit dans le laser, on dit qu'il oscille, [3].

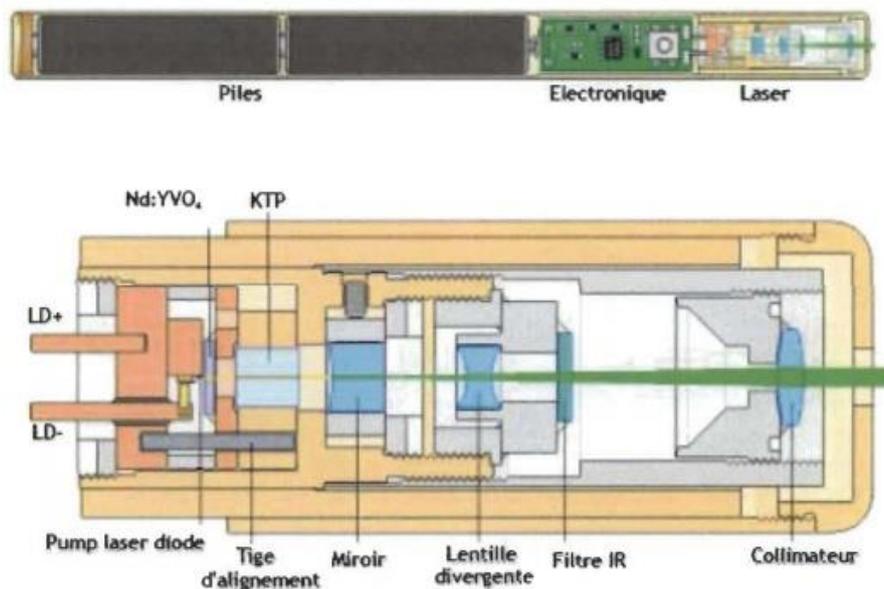
### I.4 Types de laser

Il existe divers types de lasers médicaux. On les classe selon cinq grandes familles, en fonction de la nature du milieu excité.

#### I.4.1 Lasers à solide

Les lasers à solide utilisent des cristaux, des céramiques ou des verres dopés avec différents atomes comme milieu amplificateur de la lumière. Le premier laser était un laser solide qui a utilisé le rubis. Ce sont les lasers les plus puissants. En effet, ils fonctionnent en général de manière discontinue (par exemple impulsions de 12.1 0-15 s). Ils sont capables

d'émettre aussi bien dans le visible que dans l'UV ou les rayons X. Les lasers les plus utilisées actuellement sont les lasers Nd : Y AG dans lesquels le chrome est remplacé par du néodyme et une partie des atomes d'aluminium par de l'yttrium (Y3A15012 au lieu de 4 Al2O3). Le pompage optique se fait par une lampe flash. Leur rendement est nettement supérieur à celui du « vieux » laser à rubis.



**Figure I.3** : Les lasers YAG dopés au néodyme sont toujours utilisés pour le micro usinage.

[4]

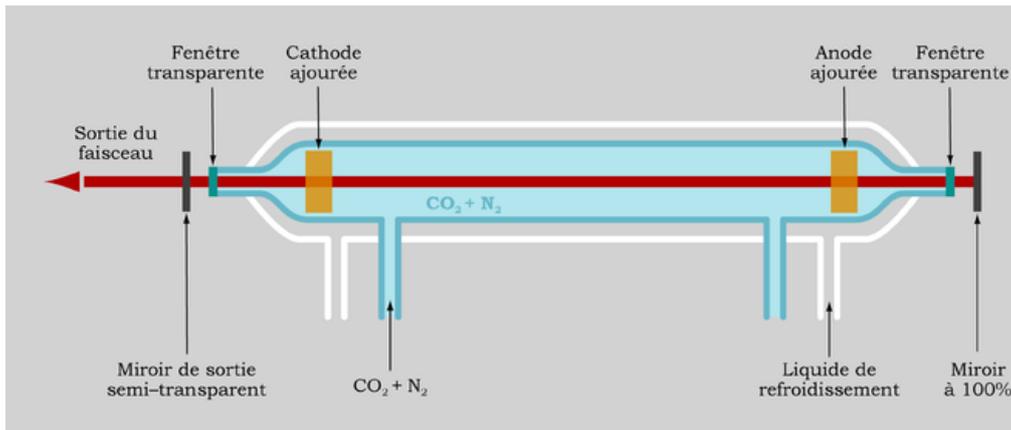
### I.4.2 Lasers à liquide

Les lasers à liquide sont caractérisés par un milieu d'émission liquide sous forme de nombreux colorants organiques. Selon le colorant les longueurs d'onde varient de l'ultra-violet à l'infrarouge. Selon le mode de pompage, le rayonnement émis peut être continu ou discontinu. [5]

Une autre classe de laser liquide utilise un liquide aprotique polaire  $\text{SeOCl}_2$  ou  $\text{POCl}_3$  comme cage enfermant des terres rares de façon analogue au laser solide. Un rendement plus élevé peut être obtenu, car il est possible de dissoudre une bien plus grande quantité de terre rare, par exemple 3,75%  $\text{Nd}^{3+}$  dans  $\text{SeOCl}_2$  que dans un cristal Nd : YAG (généralement pas plus de 1,2%). Toutefois ces liquides sont très corrosifs. [4]

### I.4.3 Lasers à gaz

Comme leur nom l'indique, le milieu générateur d'un laser à gaz est un gaz isolé dans un tube en verre, en quartz ou en céramique. Le faisceau émis est particulièrement cohérent et la fréquence d'émission est très pure. Les exemples les plus connus sont les lasers hélium - néon et les lasers à ions argon. Les lasers au dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  sont capables de produire de très fortes puissances à une longueur d'onde de  $10\mu$ . [4]



**Figure I.4** : Schéma de principe d'un laser au dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) [4]

### I.4.4 Les lasers à ions

Les lasers à gaz rares ionisés (argon-ion, krypton ion) produisent un grand nombre de longueurs d'onde. Ils sont compacts et ont une longue durée de vie par rapport à leur puissance.

### I.4.5 Lasers chimiques

La radiation laser vient de l'énergie libérée par une réaction chimique exothermique. En général, les fréquences d'oscillations correspondent à des transitions d'un produit de réaction formé dans un état d'énergie interne très excité. Les premiers lasers chimiques ont été développés par l'armée américaine. Ils étaient basés sur la réaction du fluor avec l'oxygène. Ces premiers lasers étaient très puissants, mais encombrants, horriblement corrosifs, polluants et très peu fiables. En fait, n'importe quelle réaction chimique qui émet à froid de la lumière peut être utilisée pour construire un laser. Actuellement des lasers extrêmement puissants sont basés sur oxydation de l'iode. Un mélange d'eau oxygénée et de chlore gazeux produit des molécules excitées d'oxygène. Ces molécules sont mélangées avec des molécules d'iode et

produisent des molécules excitée d'iode gazeux qui est le milieu amplificateur de la lumière. [5]

### I.5 Domaines d'application des lasers dans l'industrie

Dans l'industrie, le laser est utilisé dans les domaines d'usinage tels que le marquage, la gravure, le soudage, la découpe, le perçage et le rechargement Figure I.5 .ce dernier est utilisé pour remplacer les technologies classiques à cause de sa précision, sa flexibilité, sa rapidité et son faible cout.



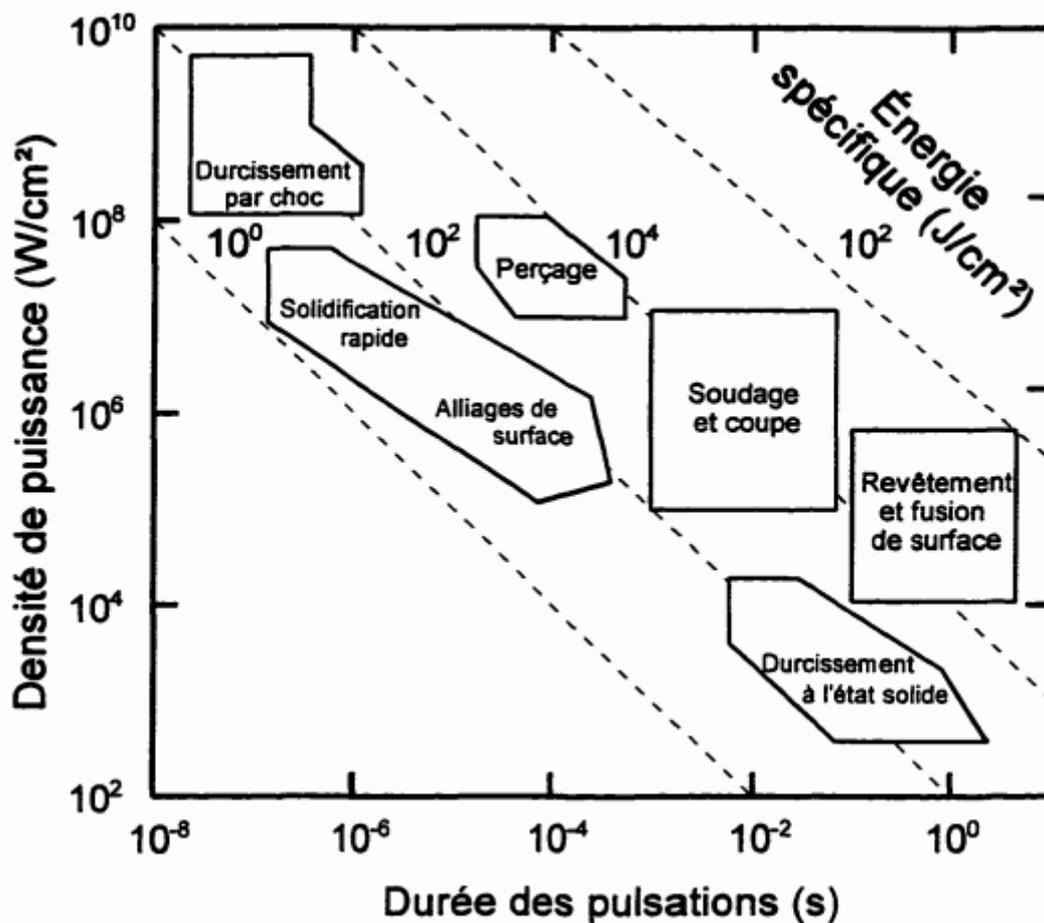
**Figure I.5** : domaine d'application du laser dans l'industrie [4]

### I.6 Interaction lasers matériaux

L'interaction entre les photons du faisceau laser et la matière est le résultat d'une excitation électronique. Les électrons du matériau absorbent les photons incidents et s'élèvent à un niveau d'énergie plus grand. Les électrons excités subissent des collisions avec les atomes du réseau cristallin pour ainsi perdre leur énergie sous la forme de phonons. Les phonons, qui sont des vibrations du réseau, produisent de la chaleur et, par conséquent, augmentent la température du matériau. Selon la quantité de chaleur absorbée à la surface, le matériau pourra, sur une mince couche, se fusionner et même se vaporiser.

Plusieurs paramètres influencent l'interaction possible entre un faisceau laser et un matériau. Il y a tout d'abord les paramètres du faisceau laser : longueur d'onde, puissance, mode d'opération, forme et diamètre du faisceau. La longueur d'onde et la puissance ont un rôle déterminant sur la capacité du laser à traiter différents matériaux. Comme l'absorptivité de la plupart des métaux diminue lorsque la longueur d'onde du faisceau incident augmente, le laser devra fournir plus de puissance si sa longueur d'onde est élevée. Le mode d'opération (pulsé ou continu) et la forme du faisceau détermineront davantage le type de traitement réalisable avec le laser. Un laser dont les impulsions sont très courtes provoque plus

facilement la vaporisation de la surface alors que des impulsions longues ou un mode continu sont préférables pour obtenir une fusion de la surface. De même, un faisceau étroit et mono-mode (profil Gaussien) est utilisé pour le perçage et la coupe car il concentre l'énergie sur un faible diamètre et favorise la vaporisation du matériau. Par contre, un faisceau plus large et multi-modes (profil rectangulaire) est davantage utilisés pour le traitement de surface car il assure un recouvrement rapide avec une profondeur de fusion plus uniforme. La figure I.6 montre les différents traitements réalisables avec un laser en fonction de la densité de puissance et du temps d'interaction du faisceau. [6]



**Figure I.6 :** Schéma représentant les applications possibles du laser en fonction de la puissance et du temps d'interaction [6]

En plus des paramètres du faisceau laser, l'interaction laser matière sera également conditionnée par plusieurs propriétés du matériau comme l'absorptivité, la conductivité thermique, les propriétés chimiques (réaction possible avec l'atmosphère ambiante), la tension de surface et la température de fusion et de vaporisation. Parmi ces propriétés, l'absorptivité plutôt faible de bien des matériaux est à l'origine de certains problèmes lors de leur

traitement. L'absorptivité dépend de la longueur d'onde du laser, de la température lors du traitement, de la densité de puissance, de la rugosité et des impuretés de surface. Pour l'améliorer, il est possible de revêtir la surface d'une couche absorbante composée de graphite ou de phosphate. À la température de fusion, l'absorption augmente fortement et si la densité de puissance fournie par le laser atteint environ 10 W/cm<sup>2</sup>, l'absorptivité devient indépendante du métal (=1). Ceci s'explique par la formation d'un mince plasma qui agit comme une couche absorbante. La présence de ce plasma peut rendre difficile le contrôle du traitement, en particulier si l'écart entre les températures de fusion et de vaporisation est faible. Dans ce cas, il sera difficile de maintenir la surface à l'état liquide car une légère variation de puissance pourra provoquer la vaporisation du métal. Une bonne conductivité thermique peut minimiser ces effets par une évacuation plus efficace de la chaleur et un taux de refroidissement plus élevé. Enfin, l'atmosphère ambiante lors du traitement est très importante car elle élimine ou provoque des réactions chimiques avec la surface du métal en fusion. Selon l'application, des gaz neutres (argon, hélium) ou réactifs (méthane, monoxyde de carbone, azote) pourront être utilisés afin de conférer aux revêtements des propriétés particulières.

### **I.7 Les lasers les plus utilisés dans l'industrie**

Il existe plusieurs types de laser, mais seulement quelques-uns sont adaptés pour les applications industrielles. D'ordre général, les lasers sont classés par type de milieux actifs. Ainsi, pour les lasers industriels, nous parlerons des lasers à gaz CO<sub>2</sub>, à barreaux Nd:YAG, à disque Yb:YAG, à fibre (YDFL) et diode (HPDL et HPDDL). Jusqu'à récemment, les lasers à gaz CO<sub>2</sub> et à barreaux Nd:YAG étaient les plus utilisés dans les applications industrielles en raison de leur capacité à produire un faisceau de haute qualité, d'une puissance élevée et continue.

Caractéristique	Laser	
	Nd-YAG	CO <sub>2</sub>
Longueur d'onde (nm)	532	10,600
mode de fonctionnement	Pulsé	Continu
Energie (mW)	380	1.3
puissance de sortie	n/a	n/a
fréquence de répétition	5 Hz	Seul
température moyenne (°C)	0.86 ou 0.23	1.1

**Tableau I.1** : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'industrie

### I.8 Les avantages des lasers

- démarrage instantané et sur demande de la source laser.
- efficacité de la conversion de l'énergie électrique à optique de 30-50%
- Aucun contact mécanique entre le substrat et l'outil.
- Pas d'exigence de vide (atmosphère, gaz...).
- Traitement rapide.
- faisceau laser de haute qualité, d'irradiance uniforme et très stable sur toute une plage de puissance.
- faible volume de la source pour la puissance optique produite et faible production de chaleur.
- Durcissement sélectif et Déformation minimale.
- Le travail précis et local.

### I.9 Traitements thermiques des matériaux

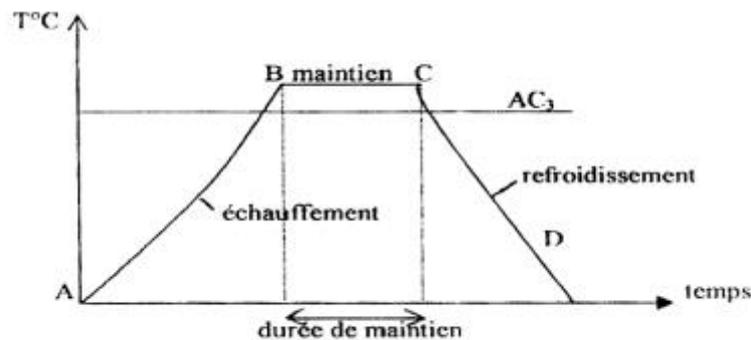
#### I.9.1 Introduction

Le procédé de traitement thermique d'un acier consiste à lui faire subir une variation de la température en fonction du temps. Il se compose d'un certain nombre d'opération de chauffage et de refroidissement. Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux

(résistance à la rupture, augmentation de la limite d'élasticité, dureté) pour une meilleure adaptation aux conditions en service. Cette amélioration vient des modifications structurales de la structure : meilleure homogénéisation, amélioration de la taille des grains (il permet de régénérer, par exemple, un métal ayant subi le forgeage et qui présente un grain trop grossier en affinant les grains). Il permet également de réduire les contraintes internes des matériaux, générées de par son histoire, qui peuvent être néfastes pour la pièce [7].

### I.9.2 Procédés des traitements thermiques

Le procédé de traitement thermique se compose de : (Figure I.7).



**Figure I.7** : Procédé de traitement thermique [7]

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC<sub>3</sub>).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
  - lente (dans le four, à l'air).
  - Assez rapide (dans l'huile).
  - Très rapide (dans l'eau).

### I.9.3 Les sources énergétiques de traitement thermique

Les sources de chaleur qui permettent les traitements superficiels de deux types :

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

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

C'est parce que la nécessité d'apport rapide d'énergie thermique avec une limitation de la diffusion thermique et un confinement des effets structuraux imposés, les chercheurs trouvent d'autres sources qui répondent aux problèmes [8].

**Les sources nouvelles** : faisceau laser, faisceau d'électrons, torche à plasma, constituent 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. [9]

Dans ce contexte on peut distinguer deux types de traitement de matière par faisceau laser :

- Traitement de matière surfacique.
- Traitement de matière volumique.

Nous nous intéressons dans ce qui suit au traitement de matière surfacique là où le laser a révolutionné l'industrie et à conquérir les autres sources traditionnelles.

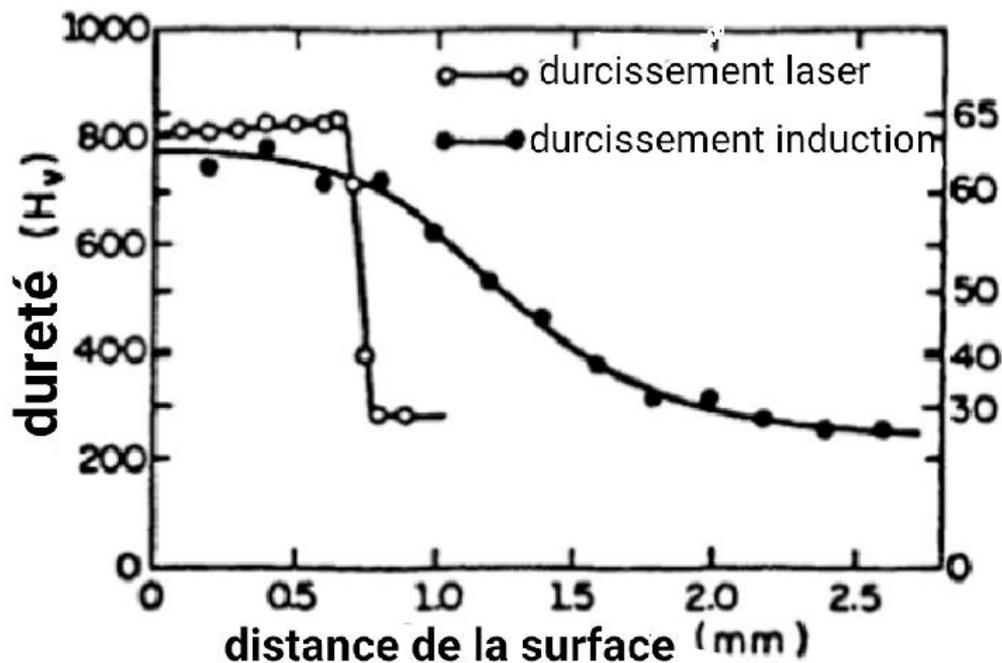
### I.9.4 Transfert thermique entre les sources classiques et le laser

Les aciers et les fontes sont les principaux candidats dans le traitement thermique par laser. Dans ce procédé, une fine couche du substrat est rapidement chauffée à la température d'austénisation par un faisceau laser, puis refroidie très rapide. Les grands gradients de température obtenus avec le chauffage laser localisé peuvent conduire à une auto-trempe rapide du matériau et à son piégeage dans des structures hautement déséquilibrées. De plus, la génération rapide de grands gradients de température peut induire des contraintes thermiques et l'excitation thermo élastique d'ondes acoustiques. Ces contraintes peuvent contribuer à la réponse mécanique du matériau, comme l'écrouissage, le gauchissement ou la fissuration.

Afin d'effectuer un traitement thermique par faisceau laser, il est nécessaire de noter les trois critères les plus importants qui sont :

- La température de la zone doit durcir atteindre largement la zone d'austénisation.
- Entre les cycles de chauffage et de refroidissement, le substrat doit être maintenu à la température d'austénisation suffisamment pour permettre la diffusion du carbone.
- La masse doit être suffisante pour que le taux de refroidissement par autodiffusion soit satisfait tel que le taux de trempe critique [10].

Les considérations métallurgiques relatives de chauffage par laser sont similaires à celles des procédés de traitement thermique classiques. (Figure I.8)



**Figure I.8:** Profil de dureté à travers la profondeur pour les méthodes de trempe au laser et de trempe par induction [10]

### I.10 Traitement thermique superficiel par laser

La modification de la microstructure d'un matériau 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 resolidification rapide du matériau irradié.

### I.10.1 Trempe superficielle au laser

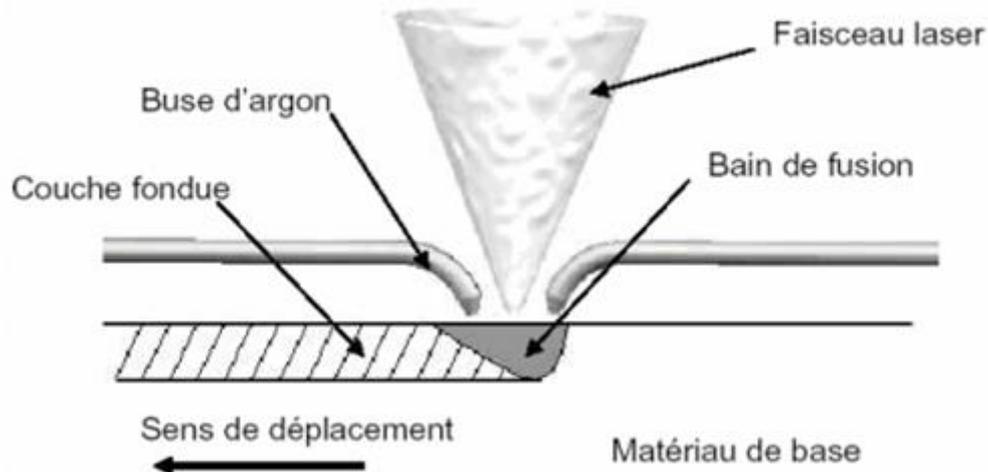
L'irradiation d'un matériau par un faisceau laser de puissance en vue de l'obtention d'un durcissement par transformation structurale sans atteindre la fusion du matériau, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant les propriétés initiales au cœur de la pièce. 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 au traitement des matériaux métalliques un intérêt commercial dans l'emploi des lasers pour le durcissement par transformation structurale. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliée 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 peut être efficace pour les aciers qui ont une concentration en carbone suffisante pour promouvoir une transformation martensitique, et pour les fontes afin de former une structure perlitique. Cette structure dépend de la vitesse de refroidissement et du diagramme de phases, mais généralement pour ce type de matériau, la dureté est augmentée et la résistance à l'usure améliorée. [11]

Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, la compagnie General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments en fonte du système de direction. Fiat l'appliqua pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan dans le traitement des éléments de transmission [11], cela afin d'améliorer la résistance à l'usure, d'obtenir un meilleur refroidissement des cylindres, et en conséquence, développer des pièces de moteurs plus compacts

### I.10.2 Fusion superficielle

Le 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.9).



**Figure I.9:** Fusion superficielle par irradiation laser [11]

On peut par ce procédé 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 en industrie automobile ont conduit à la réalisation d'une machine de traitement superficiel d'arbres à cames. Ainsi, la refusions par irradiation laser est mise en œuvre chez Volkswagen depuis 1993. [11]

### I.10.3 Traitement avec vaporisation

On utilise dans ce cas des lasers pulsés ( $\text{CO}_2$ , Nd-YAG, Excimère) qui délivrent une densité de puissance très élevée (de  $10^6$  à  $10^{11}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ ) durant des impulsions de courte durée ( $10^{-8}$  à  $10^{-6}$  secondes). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface [13]. 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 dus aux ondes de choc générées durant l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs se produisent du fait de l'absorption très importante d'énergie sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures divers) ou la découpe des surfaces (peinture, revêtement, oxydes,...) ainsi que la modification de l'état des surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, ou de l'automobile) sans altérer les propriétés du matériau en profondeur. [11]

### **I.11 Place et enjeux de traitement thermique superficiel de l'acier par laser**

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles .Le domaine de traitement thermique superficiel des aciers, économiquement important pour les industries mécaniques moderne, la plus large place revient au durcissement superficiel par trempe après chauffage par laser.

L'essor de ce procédé est lié à ses avantages techniques et économiques :

- Permet des localisations énergétiques plus précises encore que l'induction.
- Disponibilité (délai de mise en œuvre) et souplesse de la source.
- Cycles rapides et non polluants autorisant le traitement en chaîne de fabrication.
- Qualité des pièces traitées en ce qui concerne la reproductibilité du durcissement, les risques de déformations, la facilité de mise en compression naturelle des surfaces, la faible épaisseur affectée par l'oxydation de celles-ci.

<b>Trempe au chalumeau</b>	<b>Trempe par induction</b>	<b>Trempe au laser</b>
pièce de moyenne à grandetaille,avec géométries complexes	pièces de petite à grande taille	pièces de petite à grande taille, avec géométries complexes
Grande profondeur de trempe, précision limitée	Grande profondeur de trempe, zone trempée précise	zone trempée très précise, trèsfaiblesdéformations, profondeur de trempe limitée
installation et spéciales innovantes	parc machines innovantet dans l'étactuel de la technique (CNC, surveillance du processus)	installation universelle CNC avec déplacement en 3D et réglage du processus
	fiabilité du processus et reproductibilité élevées	fiabilité du processus et reproductibilité élevées

**Tableau I.2** : Comparaison entre trempe au chalumeau, trempe par induction et trempe au laser. [12]

### **I.12 Cycle de traitement thermique superficiel au laser**

Le durcissement par transformation structurelle est le traitement thermique méthode mise en pratique avec succès. En raison de l'apport d'énergie intense dans la surface de la pièce, seul le durcissement de surface est possible. La profondeur de la surface durcie dépend de la densité de puissance du faisceau laser et de la capacité du matériau irradié à absorber la lumière rayonnée définie par sa longueur d'onde. Chauffage laser du matériau à caractérisé par un chauffage local et un refroidissement rapide n'est cependant généralement pas

approprié pour être appliqué au durcissement par précipitation, à la stérilisation, à la normalisation et à d'autres méthodes de traitement thermique.

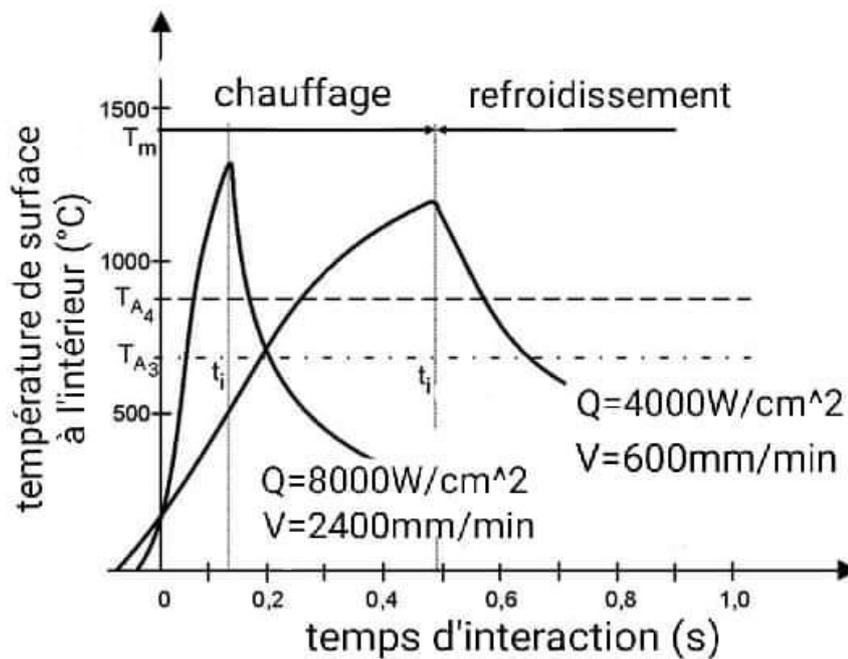


Figure I.10 : durcissement surface au laser [13]

### I.13 Diagramme fer-carbone

Le système fer-carbone est théoriquement décrit par le diagramme fer-carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer  $\alpha$  précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ( $C < 2,11\%$ , environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer  $\text{Fe}_3\text{C}$  appelé cémentite. Il est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre fer-cémentite dont la figure I.11 présente un schéma.

En dehors des domaines de solidification, ce diagramme fer-cémentite fait apparaître :

- sur l'axe des ordonnées, les domaines de température dans lesquels les différentes formes allotropiques du fer pur sont stables ;
- le domaine ABCDEFGHI d'existence du fer  $\gamma$  (dont la limite inférieure IHGF définit le point de transformation symbolisé par  $Ae_1$ ) et qui inclut :
  - ❖ le domaine mixte ABC (fer  $\delta$ + fer  $\gamma$ ),
  - ❖ le domaine mixte DEFG (fer  $\gamma$ + cémentite),

- ❖ le domaine mixte GHI (fer  $\gamma$ + fer  $\alpha$ ),
- ❖ le domaine ACDGI d'existence du fer  $\gamma$  seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié fer-carbone est, à l'état solide, monophasé CFC, tout le carbone étant en solution solide dans le fer  $\gamma$  (phase appelée austénite) et dont la limite inférieure IG définit le point de transformation symbolisé par Ae3;
- la limite DG de solubilité du carbone dans le fer  $\gamma$  que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\text{Log (C \%)} = 1,363 - 1\,475/T \quad \text{I.1}$$

Avec T (K) température et qui définit le point de transformation symbolisé par Aem;

- le domaine IGFJK d'existence du fer  $\alpha$ (dont la frontière IG définit le point de transformation symbolisé par Ae3) et qui inclut :
- ❖ le domaine mixte IGH (fer  $\alpha$ + fer  $\gamma$ ),
- ❖ le domaine mixte HGFJK (fer  $\alpha$ + cémentite),
- ❖ le domaine IHK d'existence du fer  $\alpha$  seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié fer-carbone (à très basse teneur en carbone) est, à l'état solide, monophasé CC, le carbone étant en solution solide dans le fer  $\alpha$  (phase appelée ferrite);
- la limite HK de solubilité du carbone dans le fer  $\alpha$  que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\text{Log (C \%)} = 2,36 - 4\,030/T \quad \text{I.2}$$

- l'évolution, en fonction de la teneur en carbone de la limite supérieure IG du domaine mixte fer  $\alpha$  – fer  $\gamma$ (IGH) qui traduit l'influence du carbone sur l'état d'équilibre de l'austénite ; en présence de carbone en solution solide, celle-ci est stable à des températures inférieures à 912 °C. Le carbone stabilise donc l'austénite et, de ce fait, on le dit «gamma gène » ;
- l'existence d'un eutectoïde dont les coordonnées sont :

$$\text{C} = 0,77 \% \text{ à } 727 \text{ °C} \quad \text{I.3}$$

Et qui est constitué, lors de sa formation à 727 °C, par un agrégat de grains de ferrite (contenant 0,02 % de carbone) et de grains de cémentite Fe<sub>3</sub>C (à 6,69 % de carbone). Dans un

## CHAPITRE I : Généralités sur les lasers

alliage fer-carbone, cet agrégat contient en poids (les proportions en volume sont pratiquement identiques) 88,78 % de ferrite et 11,22 % de cémentite (les proportions à 20 °C sont de 88,49 % de ferrite pratiquement sans carbone et 11,51 % de cémentite, cette dernière proportion a augmenté par suite de la précipitation du peu de carbone qui était en solution dans la ferrite à 727 °C). La réaction eutectoïde s'écrit :



Dans les conditions d'équilibre, elle se déroule à la température constante de 727 °C (pour un acier Fe-C non allié) ; [14]

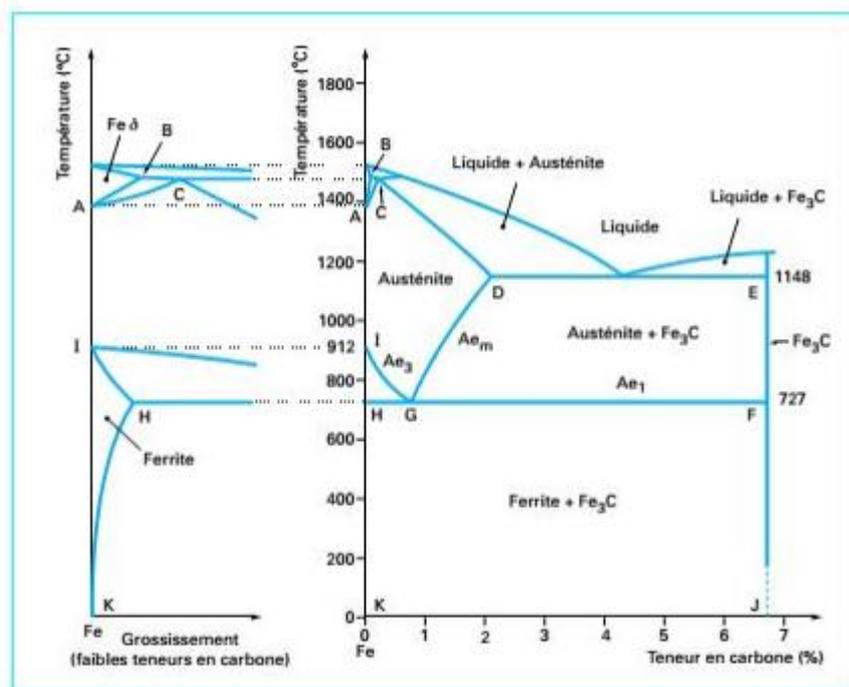


Figure I.11: Schémas du diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C. [14]

## **I.14 Conclusion**

Les matériaux sont les principaux candidats dans le traitement thermique superficiel par laser, Dans notre premier chapitre nous avons présenté en bref, quelques généralités sur les lasers et leurs domaines d'applications. Ainsi que les différents types de traitement thermique superficiel qu'il s'agit de bombarder la surface de la matière avec une énorme densité provoquant ainsi une augmentation très importante de température en une fraction de seconde suivi d'un refroidissement très rapide qui nous permet de traité la surface son atteindre l'intérieur de la pièce.

## **Chapitre II : Synthèse bibliographique**

## **II. Modélisation Mathématique et Simulation du Problème de traitement thermique de superficiel de l'acier par laser**

### **II.1 Introduction**

Le durcissement des aciers au laser constitue l'une des approches les plus précises de l'industrie. Ce procédé de traitement thermique requiert le développement de recette d'application pour accommoder chaque type de composante mécanique à traiter. Cette étude se concentre sur la modélisation et la simulation des flux thermiques issue de l'interaction d'un laser avec une pièce d'acier. On y développe une fonction numérique permettant de modéliser automatiquement et avec précision un faisceau laser parcourant des surfaces complexes, telle que la denture d'une roue dentée. L'étude se concentre sur la modélisation par éléments finis du procédé de trempe au laser. Deux approches de modélisation sont mises sur pied et permettent de simuler des situations simples sous le logiciel COMSOL. Ces approches sont validées numériquement en reproduisant les essais d'études tierces. La fonction numérique est développée sous le logiciel MATLAB en se basant sur l'une de ces approches. Elle est élaborée afin de modéliser le passage du laser sur les surfaces variables d'une géométrie 3D tout en incluant les déformations du faisceau laser et les variations du coefficient d'absorption en fonction des conditions d'interaction laser/surface. [12]

### **II.2 Définition de la modélisation**

La modélisation du procédé de trempe au laser est le développement d'un outil numérique (une fonction) qui permet d'effectuer une modélisation juste et précise. Il fait état des étapes concourantes nécessaires au développement d'un tel outil de modélisation tout en s'appuyant sur les paramètres de matériau et le laser étudié. On y élabore le modèle numérique de base en posant les hypothèses de travail et les équations qui gouvernent les phénomènes physiques.[15]

#### **II.2.1 Etape de modélisation**

- On se fixe les objectifs de la modélisation.
- On fait l'inventaire des informations (données externe, données expérimental).
- On réalise un modèle (spécifications, construction en fonction des axiomes et hypothèses).

- On identifie les paramètres du modèle.
- On valide en confrontant le modèle à la réalité.
- On tire des conclusions.

### II.2.2 Les objectifs de la modélisation

- décrire (résumer) les données.
- prédire (simuler), c'est à dire faire des inférences.
- expliquer (comprendre) c'est à dire avoir des objectifs mécanistiques.

### II.3 Définition de la simulation

La simulation de procédé trempé 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.[15]

#### II.3.1 Méthodes de simulation

- Méthodes de Runge-Kutta pour le traitement numérique des équations différentielles.
- Méthode des éléments finis ou Méthode des caractéristiques pour le traitement des équations aux dérivées partielles.
- Méthode de Monte-Carlo en physique statistique, physique des matériaux, physique nucléaire, physique des particules, mathématiques, statistiques et économétrie.

#### II.3.2 Les objectifs de la simulation

- Compléter les informations, c'est à dire connaître les valeurs intermédiaires (interpolation) ou une valeur extérieure à l'intervalle observé (extrapolation).
- L'exactitude et la précision des résultats obtenus seront fonction du modèle retenu.
- Faire des inférences c'est à dire prédire ce que sera le comportement du système primaire lorsqu'on modifie les paramètres de structure du modèle ou encore son entrée.

## II.4 Conditions aux limites spatiales et temporelles

### II.4.1 Conditions initiales

C'est la distribution des températures à  $t=0$  :  $T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z)$ . Dans le cas général, la température initiale est homogène, constante est bien définie dans le matériau bicouche. Dans le cas d'un matériau multicouche, chaque couche peut avoir sa propre température initiale.

### II.4.2 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 (condition initiale) sont exigées pour aboutir à une solution de l'équation de départ (figure II.1). [16]

Les trois types de conditions aux limites souvent rencontrées dans les transferts de chaleur sont :

- ✓ Les conditions aux limites de première espèce dite aussi conditions aux limites de type température imposée (problème de Dirichlet), la température à la surface est connue à tout instant.

$$T_s = f_s(M_s, t) \quad \text{II.1}$$

Avec  $M_s$  point de la surface du système

Cas particulier : surface isotherme ( $T_s = \text{cte}$ ).

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = f(M_s, t) \quad \text{II.2}$$

- ✓ Condition aux limites de deuxième espèce dites aussi conditions aux limites de type flux imposée (problème de Neumann), dans ce cas, la densité de flux à la frontière du domaine étudié, est connue à tout instant.

$$T_s = f_s(M_s, t) \quad \text{II.3}$$

Cas particulier : surface adiabatique ou système isolé :  $-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s=0}$

- ✓ Condition aux limites de troisième espèce dites conditions de Fourier ou aussi de Newton; transfert linéaire (problème de Fourier).

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} s = h(T_s - T_{amb}) \quad \text{II.4}$$

Avec h : coefficient d'échange thermique superficiel (en W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>)

T<sub>amb</sub>: température de référence du milieu extérieur

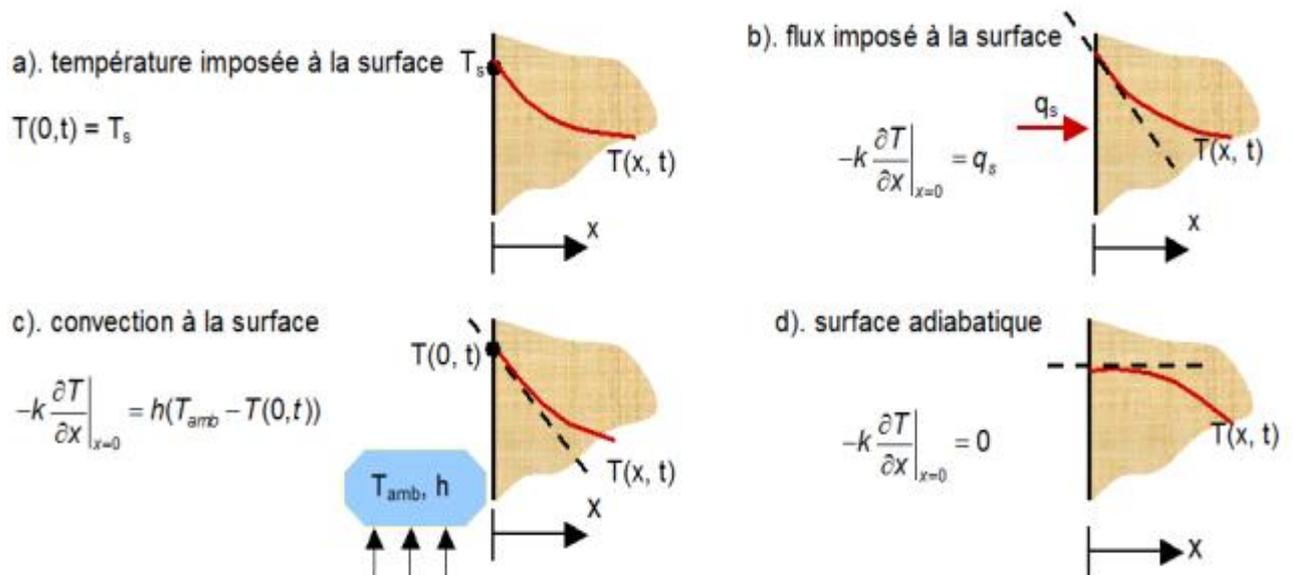


Figure II.1 : Exemples de conditions aux limites [16]

## II.5 Analyse de modèle d'A.M DEUS et VILAR

### II.5.1 Descriptions

A.M DEUS ET VILAR ont développé une expression analytique de la température à la surface d'un matériau irradié par laser dans laquelle la variation de l'absorbance avec la température suit l'équation de Hagen-Rubens. Le régime de conduction thermique sera considéré comme unidimensionnelle, une approximation valable lorsque la caractéristique la distance de conduction thermique est négligeable par rapport au diamètre du faisceau laser. De plus, ils appliqueront la présente analyse à l'estimation de la durée d'impulsion conduisant à fondre la surface d'un matériau irradié par laser, pour une densité de puissance constante. [17]

### II.5.2 Hypothèse simplificatrice

a)  $r \gg 2 \sqrt{\alpha t} \Rightarrow$  conduction thermique unidimensionnelle.

- b)  $L \gg 2\sqrt{at} \Rightarrow$  semi-infinie solide.
- c)  $\delta \ll \sqrt{at\rho}$ ,  $\Rightarrow$  chauffage de surface.
- d) La surface est polie et propre.
- e) La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont prises comme des constantes.
- f) La résistivité électrique varie linéairement avec la température.
- g) La capacité d'absorption varie avec la température selon Hagen-Rubens équation.
- h) La forme de l'impulsion laser est carrée. [17]

### **II.5.3 Formulation des équations**

#### **II.5.3.1 Équations de départ**

Pour une conduction thermique unidimensionnelle avec des propriétés thermiques constantes et semi-infinies géométrie nous écrivons :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 \leq x < \infty \quad \text{II.5}$$

#### **II.5.3.2 Condition aux limites et initiales**

$$\begin{aligned} T(x, t=0) = 0 = T(x=\infty, t) & \quad \text{II.6} \\ -K \frac{\partial T}{\partial x} = ((x = 0, )) & \end{aligned}$$

#### **II.5.3.3 Résultat de model :**

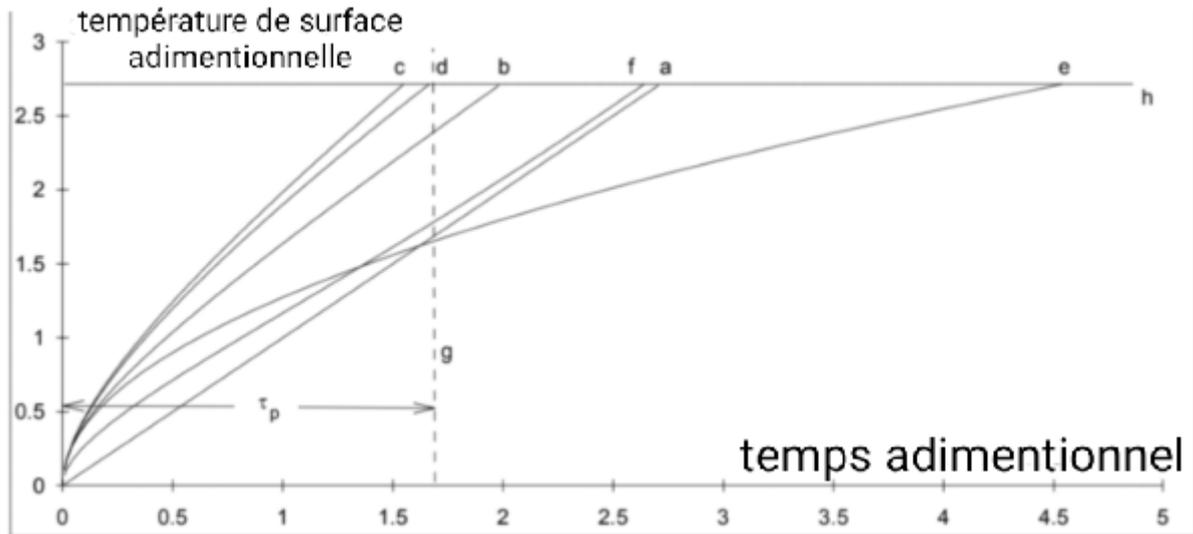


Figure II.2 : Résultats pour le cuivre.[17]

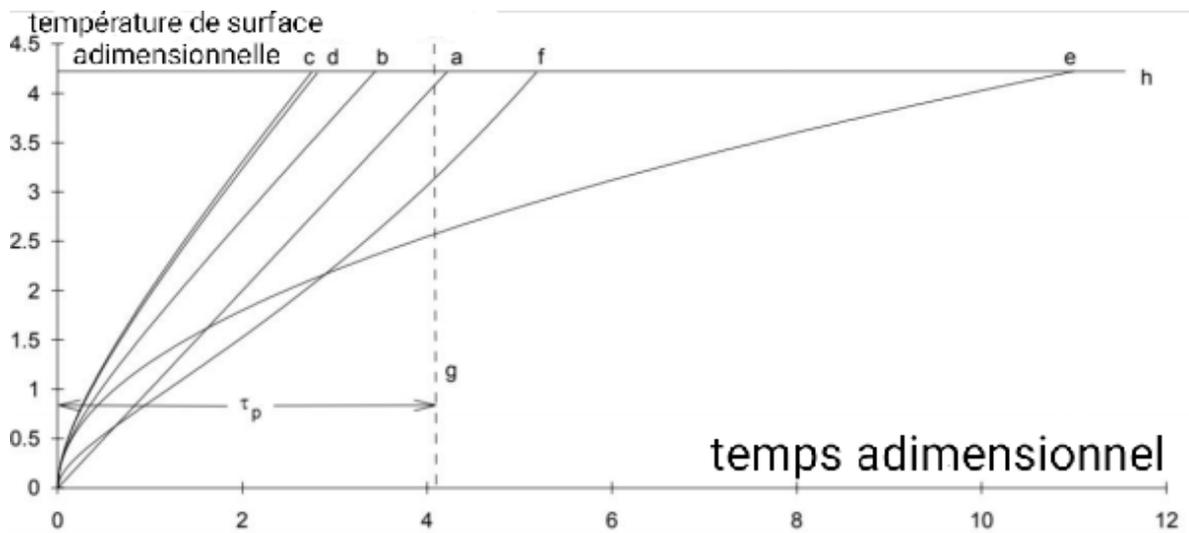


Figure II.3 : Résultats pour l'aluminium.[17]

Les valeurs expérimentales de la température de fusion adimensionnelle et de la durée d'impulsion adimensionnelle sont représentées par des lignes horizontales et verticales, respectivement, pour une meilleure comparaison avec les résultats obtenus par les modèles a-f. On voit que les solutions approchée (a) et linéaire (b) correspondent bien aux résultats expérimentaux (g), contrairement à l'expression de Carslaw et Jaeger (e). Les solutions (a) et (b) prédisent des valeurs de durée d'impulsion similaires à celles obtenues par les calculs numériques (c) et (d) ainsi qu'aux résultats de Sparks et Loh (f), tout en montrant une plus grande simplicité. Nous voyons dans les deux cas que la dépendance à la température des propriétés thermiques influence également les résultats, mais pas autant que l'absorption.

Ainsi, la solution linéaire donne un moyen particulièrement simple d'estimer les seuils de fusion, en évitant les grandes erreurs qui surviennent habituellement en utilisant l'approximation d'absorption constante.

Le modèle de Deus et Vilar est bien limité pour le cas de surface isolée (pas de perte avec convection).

### II.6 Gaz environnant

Lorsqu'une pièce d'acier est traitée thermiquement dans une atmosphère non contrôlée (ex. : à l'air libre), il se produit des réactions chimiques avec les gaz ambiants. Ces réactions mènent à la formation d'une couche d'oxyde à la surface qui croît de façon exponentielle avec la température et le temps d'interaction avec les gaz environnants. Dans le cas de la trempe au laser, ce phénomène prend place dans la zone d'interaction, là où les températures sont très élevées.

Plusieurs équipes rapportent l'utilisation de jets de gaz ponctuel, alors que d'autres utilisent une enceinte close dans laquelle on place la pièce et injecte un gaz inerte. Pour la première approche, des buses sont disposées de manière à obtenir un jet de gaz qui recouvre la zone d'interaction. Le débit dépend de la méthode employée pour protéger la surface, du type de buse et de l'angle d'approche. La littérature rapporte des débits allant de 15 à 50 l/min. L'argon et l'azote sont les plus employés. L'Hélium est plus dispendieux, mais son coefficient de transfert thermique est beaucoup plus élevé que l'azote : certains auteurs suggèrent que l'extraction de la chaleur à la surface pourrait être plus élevée et donc prévenir la fusion. [18]

### II.7 Modèles Mathématique la trempe au laser

#### II.7.1 Modèles analytiques

**BLACKWELL B.F** [19] a examiné analytiquement le phénomène de l'enlèvement explosif de la matière traitée, observé par **DABBY et PAEK** [20], et a calculé le profil de la température dans un corps semi infini durcit avec une source laser assumée comme une loi en décroissance exponentielle avec la profondeur  $x$ . Une condition à la 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** ont d'abord discuté la solution fondamentale au problème considéré par **BLACKWELL**. 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. Dans les applications pratiques de TTL, la pulsation laser est dépendante du temps selon plusieurs formes.

### II.7.2 Modèles de simulation

En 1997, **Ion et Anisdahl** [21] ont publié le développement du logiciel Pro LASER, qui permet de déterminer les paramètres laser à utiliser en fonction des résultats de trempe désirés. Par exemple, l'utilisateur fournit au logiciel les dimensions des trempes à obtenir, le type d'acier, le type de laser et le logiciel retourne la taille de la tache focale, la vitesse d'avance et la puissance optique nécessaire. En se basant sur le type de laser, le coût de l'électricité et le coefficient d'absorption, le logiciel inclut une estimation des coûts de la trempe par unité de surface (\$/cm<sup>2</sup>). Le coefficient d'absorption utilisé par le logiciel est fixé à 62 %, donnée obtenue empiriquement via des essais appliqués sur différents aciers avec un laser CO<sub>2</sub>.

En 2010, l'équipe de **Martínez et al.**[22] développe un simulateur afin de prédire les résultats de trempe au laser sur une pièce à géométrie complexe. Il permet de modéliser le passage du laser (mouvement sur trois axes) et les flux thermiques en découplant. De plus, il intègre un modèle de transformation métallurgique basé sur l'équation proposé Par JohnsonMehl-Avrami, permettant de modéliser le changement de phase de l'acier, donc la portion d'acier transformé en austénite. L'outil numérique développé, nommé LATHM, couple l'utilisation de MATLAB pour la programmation et Visual Studio pour le développement de l'interface.

**BOUAZIZ. M.N et BOUTALBI. N** [23] Ont proposé une solution semi analytique de l'équation différentielle non linéaire de la conduction thermique résultante du processus de traitement thermique superficiel pour un corps semi infini en1D, avec une condition de frontière convective et une source laser dépendante du temps. Une approche numérique, basée sur l'algorithme de STEHFEST pour l'inversion de la solution en domaine réel est adoptée. L'obtention des solutions pour une large gamme de différentes sources laser temporel-dépendant permet la connaissance de leurs sensibilités et distribution énergétique sur le traitement thermique.

### II.7.3 Modèles numériques

**BESSROUR .J et al** [24] 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 thermo physiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement aussi que celles par convection.

**D. KECHMAIR et E. LUNEVILLE** [25] ont mis en œuvre des codes de calcul pour rendre l'équation non linéaire instationnaire de conduction pour décrire la trempe superficielle des aciers par laser CO<sub>2</sub> continue. Le modèle adopté néglige l'interface solide/solide et considère que le dépôt d'énergie a lieu en surface.

### II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié des généralités sur la modélisation et la simulation et leurs principes de fonctionnement, puis on a découvert que grâce aux outils de calculs d'aujourd'hui, la modélisation numérique est l'approche à favoriser pour simuler le procédé de trempe au laser. Plusieurs approches de modélisation de la trempe au laser ont été proposées par diverses équipes de recherche. Toutefois, aucune d'entre elles n'intègre à la fois la gestion du coefficient d'absorption, la déformation de la tache focale et la variation de l'irradiance en fonction des conditions d'interaction entre la surface de la composante et le laser.

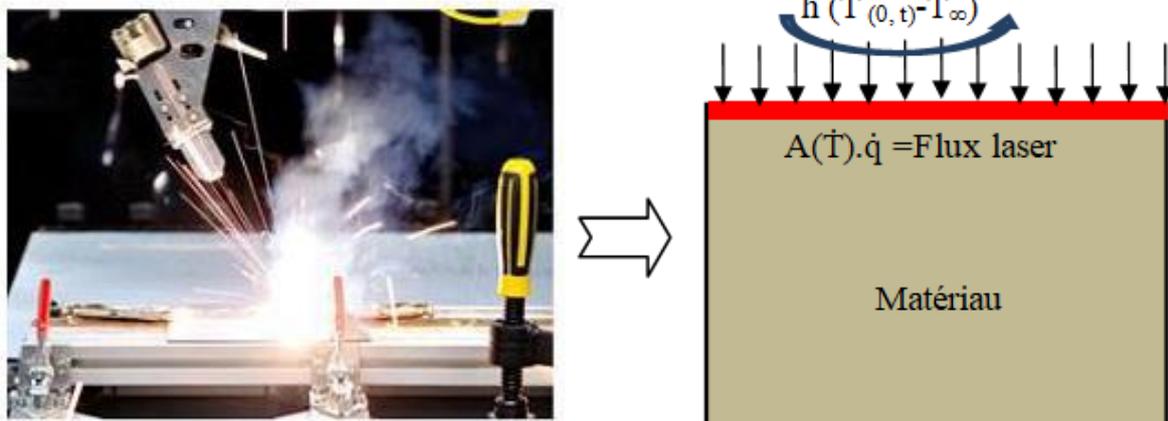
# **Chapitre III : Modélisation Mathématique**

### III. Modélisation mathématiques

#### III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va étudier la dépendance de la température d'un acier par Laser CO<sub>2</sub>, Pour cela on va utiliser les équations aux dérivées partielles paraboliques qui sont rencontrées dans des nombreuses applications scientifiques. Parmi ces applications le traitement thermique superficiel non linéaire au laser dans les modèles mathématiques qui utilise une équation différentiel parabolique considère-les comme un problème dépendant du temps dans une dimension spatiale. Pour résoudre cette équation différentielle on repose sur la commande (pdepe) de Matlab.

#### III.2 Description du modèle



Modèle physique de trempe superficielle

Géométrie du problème

**Figure III.1** : Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser

Le mécanisme de traitement thermique en phase solide se compose de chauffer localement et rapidement le matériau de surface supérieur à la température critique du changement structural, et légèrement inférieure à son point de fusion. Le refroidissement de la zone traitée se fait par trempe vers le noyau de la pièce.

En général, le traitement thermique de surface au laser et la trempe sont impliqués dans un processus de chauffage limité par conduction.

### III.3 Hypothèses simplificatrice

- Le modèle est considéré en 1D.
- Le matériau traité est isotrope homogène supposé comme semi infini.
- Les propriétés thermo physiques du substrat sont indépendantes de la température.
- Les pertes d'énergie par convection et rayonnement sont négligeables.
- l'absorptivité au laser CO<sub>2</sub> et dépend de la température selon le polynôme déduit des résultats expérimentales.

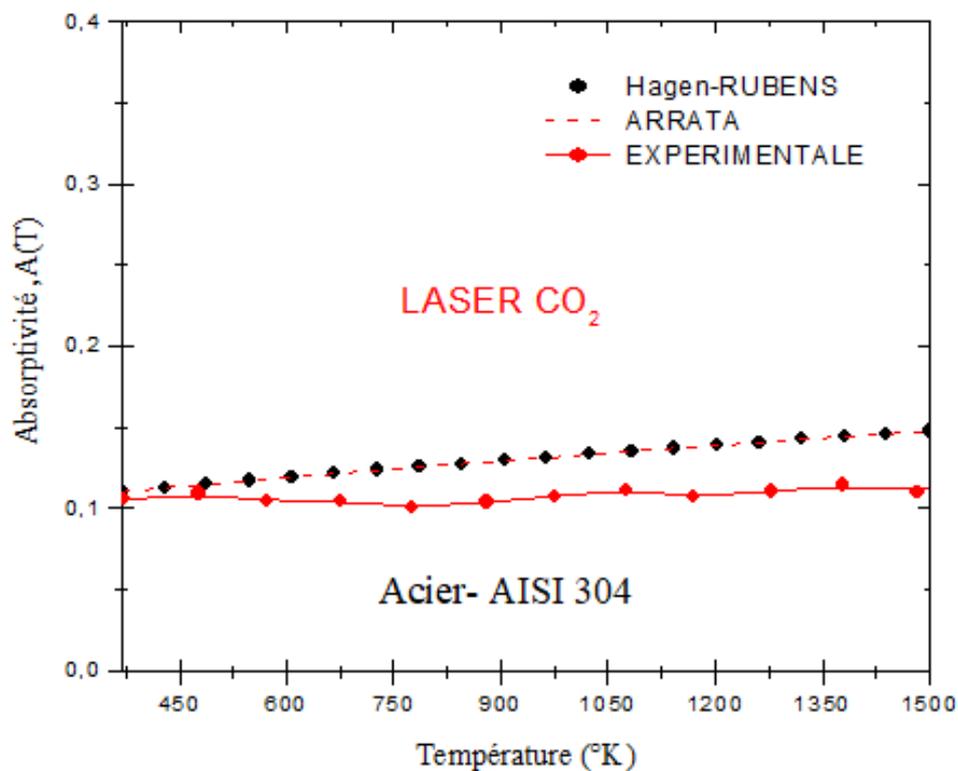


Figure III.2 : Profil de l'absorptivité de l'acier au laser CO<sub>2</sub>

### III.4 Formulation des équations

#### III.4.1.1 Equation de base

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \quad \text{III.1}$$

### III.4.1.2 Conditions initiales et aux limites

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

$$T(x=\infty,t)=0 \quad \text{III.3}$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t) \cdot A(T) - h(T(0,t) - T_{\infty}) \quad \text{III.4}$$

### III.5 Description de la méthode de résolution (pdepe)

Sol = pdepe (m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan) résout les problèmes de valeur d'initial-frontière pour les systèmes d'équations aux dérivées partielles parabolique et elliptiques dans un espace variable x et de temps t. pdefun, icfunetbcfun sont des poignées de fonction. Les équations différentielles ordinaires (ODEs) résultant de discrétisation en espace sont intégrées pour obtenir des solutions approximatives à des moments spécifiées dans tspan. La fonction pdepe retourne des valeurs de la solution sur un maillage fourni dans xmesh.

Pdepe résout les équations aux dérivées partielles de la forme :

$$c(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \frac{\partial u}{\partial x} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} (x^m f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})) + s(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \quad \text{III.5}$$

La cale d'équations aux dérivées partielles pour  $t_0 \leq t \leq t_{\text{fin}}$  et  $a \leq x \leq b$ . l'intervalle [a,b] doit être finie. m peut être 0, 1, ou 2, correspondant à la dalle, cylindrique ou symétrie sphérique, Respectivement. Si  $m > 0$ , alors a doivent être  $\geq 0$ .

Dans l'équation III.5  $f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$  est un terme de flux et  $s(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$  est un terme source.

L'accouplement des dérivées partielles par rapport au temps est limité à la multiplication par une matrice diagonale  $c(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$ . Les éléments diagonaux de la matrice sont identiquement nuls ou positifs. Un élément qui est identiquement zéro correspond à une équation elliptique ou non à une équation parabolique. Il doit y avoir au moins une équation parabolique. Un élément de c, qui correspond à une équation parabolique peut disparaître à valeurs isolées de x, si les valeurs de x sont les point de maillage. Discontinuités dans c ou s, en raison des interfaces matérielles sont autorisées sous réserve qu'un point de filet est placé à chaque interface.

Pour  $t=t_0$  et tous les x, les composants de la solution satisfont les conditions initiales de la forme :

$$u(x, t_0) = u_0(x) \quad \text{III.6}$$

Pour tous les  $t$  et soit  $x = a$  ou  $x = b$ , les composants de la solution satisfaisant une condition aux limites de la forme :

$$p(x, t, u) + q(x, t) f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0 \quad \text{III.7}$$

Elément de  $q$  sont identiquement nuls ou jamais zéro. Notez que les conditions aux limites sont exprimées dans le flux plutôt que  $\frac{\partial u}{\partial x}$ . En outre, des deux coefficients, seulement  $p$  peut dépendre d' $u$ .

Dans l'appel `sol = pdepe(m, pdefun, icfun, bcfun, xmesh, tspan)`:

- $m$  correspond à  $m$ .
- `Xmesh(1)` et `xmesh(end)` correspondent aux  $a$  et  $b$ .
- `tspan(1)` et `tspan(end)` correspondent à  $t_0$  et  $t_f$ .
- `pdefun` calcule les termes  $c$ ,  $f$  et  $s$  (équation 1). Il a la forme  $[c, f, s] = \text{pdefun}(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$

Les arguments d'entrées sont scalaires  $x$  et  $t$  et vecteurs  $u$  et  $\frac{\partial u}{\partial x}$  qui se rapprochent de solution  $u$  et sa dérivée partielle par rapport à  $x$ , respectivement.  $c$ ,  $f$  et  $s$  sont des vecteurs colonnes.  $c$  Stocke les éléments diagonaux de la matrice  $c$  (équation 1).

- `icfun` évalue les conditions initiales Il a la forme  $u = \text{icfun}(x)$

Lorsqu'elle est appelée avec un argument  $x$ , `icfun` évalue et retourne les valeurs initiales des Composants de la solution à  $x$  dans la colonne vecteur  $u$ .

- `bcfun` évalue les conditions de  $p$  et  $q$  des conditions aux limites. Il a la forme  $:[pl, ql, pr, qr] = \text{bcfun}(xl, ul, xr, ur, t)$

$ul$  est la solution approximative à la limite de gauche  $xl = a$  et  $ur$  est la solution approximative à la limite droite  $xr = b$ .  $pl$  et  $ql$  sont les vecteurs colonnes correspondant à  $p$  et  $q$  ont évalué à  $xl$ , de même  $pr$  et  $qr$  correspondent aux  $xr$ . Lorsque  $m > 0$  et  $a = 0$ , la solution près  $x = 0$  exige que le flux  $f$  s'annule en  $a = 0$ . `pdepe` impose cette condition limite automatiquement et il ignore les valeurs retournées en  $pl$  et  $ql$ .

`pdepe` retourne la solution comme un tableau multidimensionnel  $sol$ .  $U_{j,ai} = u_i = \text{sol}(:, :, i)$  est une approximation au composant  $i$ th de la solution vecteur  $u$ . L'élément  $u_i(j, k) = \text{sol}(j, k, i)$  se rapproche  $u_{j,ai}(t, x) = \text{tspan}(j, xmesh(k))$ .

$u_i = \text{sol}(j, :, i)$  se rapproche de composant  $i$  de la solution à la fois `tspan(j)` et des points de maille `xmesh(:)`. utiliser `pdeval` pour calculer le rapprochement et ses dérivées partielles à points non compris dans `xmesh`.

`sol = pdepe(m, pdefun, icfun, bcfun, xmesh, tspan, options)` résout comme ci-dessus avec les

paramètres d'intégration par défaut remplace par des valeurs dans les options, un argument créée avec la fonction `odeset`. Seules certaines options du solveur ODE sous-jacents sont disponibles dans `pdepe` : `RelTol`, `NormControl`, `Initial Stepet Max Step`. Les valeurs par défaut obtenus en laissant l'argument d'entrée options off sera généralement satisfaisantes.

`[sol,tsol,sole,te,ie] = pdepe (m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan,options)`

Avec les 'Events' propriété dans options définies à une poignée de fonction `Events`, a résolu comme indiqué ci-dessus tout en trouvant également ou les événements fonctions  $g(t,u(x,t))$  sont nuls. Pour chaque fonction, vous spécifiez si l'intégration est de mettre fin à un zéro et qu'importe la direction du passage par zéro. Trois vectrices colonnes sont retournées par les événements :

`[Value, isterminal, direction] = événements (m, t,xmesh, umesh). xmesh`

Contient le maillage spatial et `umesh` est la solution aux points de maillage. Utilisation de `pdeval` pour évaluer la solution entre mesh points. Pour la fonction d'événement de `jeth`, `value(i)` est la valeur de la fonction, `ISTERMINAL(I) = 1` si l'intégration et de mettre fin à un zéro de cette fonction d'événement et 0 sinon. `Direction(i) = 0` si tous les zéros sont d'être calculé (par défaut), +1 si ce n'est des zéros ou la fonction événement augmente, et -1 si ce n'est des zéros ou la fonction de l'événement est en baisse. Sortie `tsol` est une vectrice colonne de temps spécifiés dans `tspan`, avant la première épreuve terminale. `SOL (j,,:)` est la solution à `T(j)`. `TE` est un vecteur de fois au cours de laquelle les événements se produisent. `SOLE (j,,:)` est la solution à `TE (j)` et indices en vecteur `IE` spécifient quel événement s'est produit. [13]

### III.6 Résultats et discussion

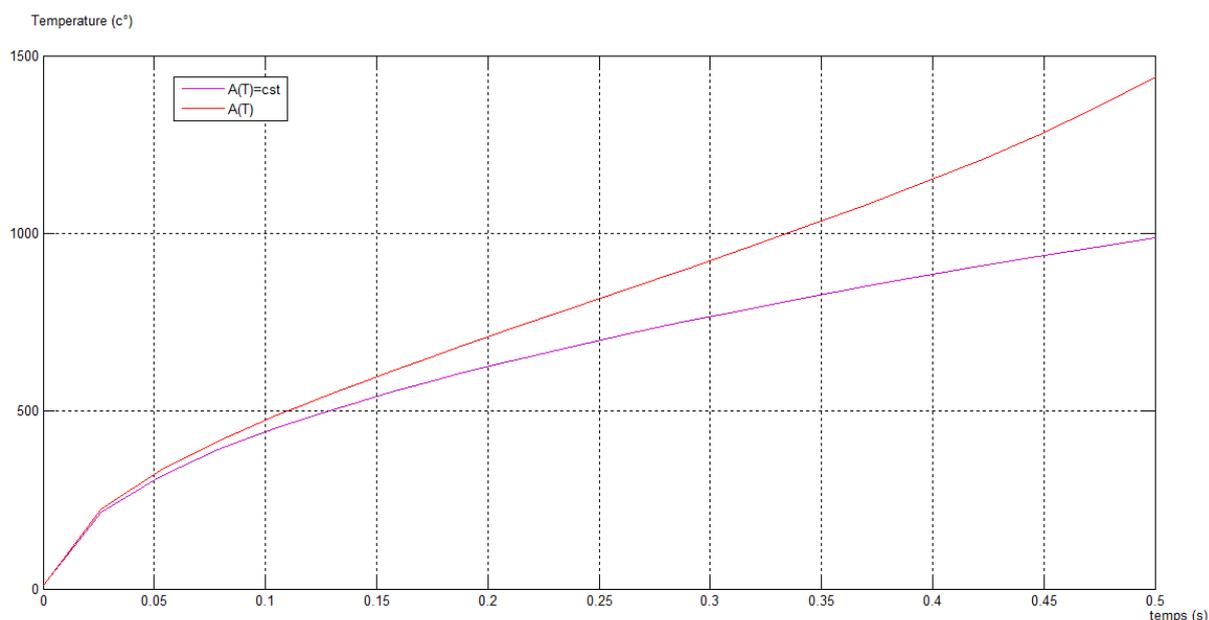
#### III.6.1 Equation de l'absorptivité pour l'acier sans le coefficient de convection

##### III.6.1.1 Pour la source laser CO<sub>2</sub> constante

$$q = I_0 * A$$

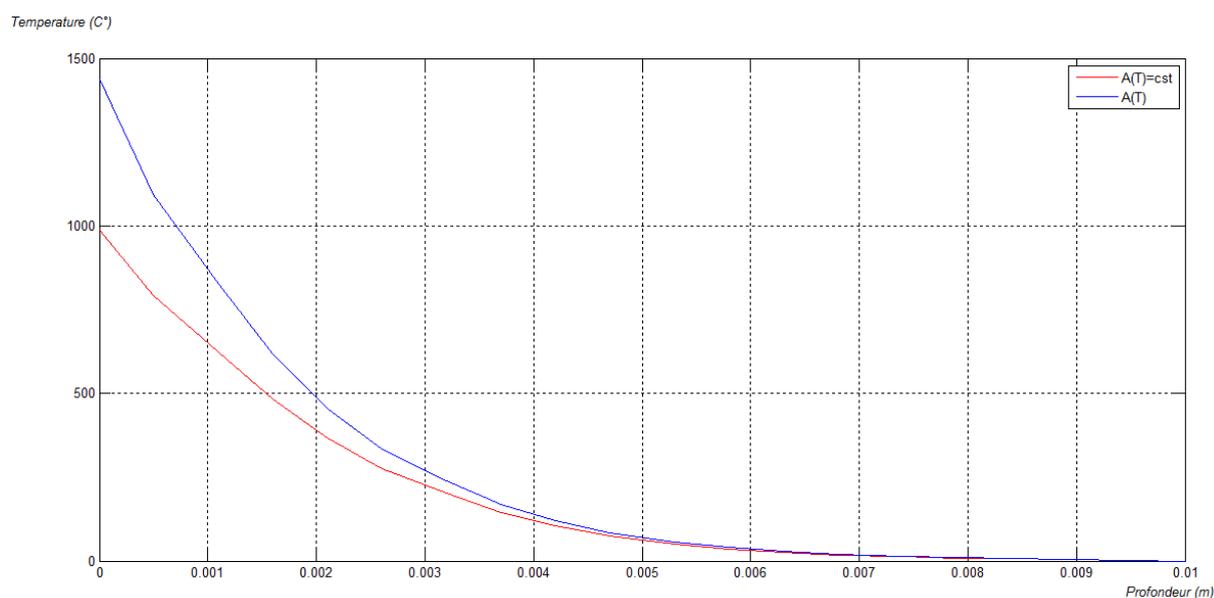
**A/pour :**

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0.295 \\ A(T) = (0.295 + 0.0000579 * T(0, t) - T_0 - 0.0000000.108 * (T(0, t) - T_0)^2 - 0.0000000000653 * (T(0, t) - T_0)^3) \end{array} \right.$$



**Figure III.3 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $\text{CO}_2$

La figure III.3, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser  $\text{CO}_2$ . Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 0.5\text{s}$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 31.27% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III.4 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $\text{CO}_2$

La figure III-4, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO<sub>2</sub> la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 31.27 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce voir le **Tableau III-1** cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Laser CO <sub>2</sub>	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (K) X= 00 mm	988.573	1438.4	31.27%
Température (K) X= 1.1 mm	623.0074	825.9	24.56%
Température (K) X= 3.2 mm	201.3719	239.4	15.88%
Température (K) X= 4.2 mm	104.1075	119.4	12.80%
Température (K) X= 5.3 mm	51.6753	57.5	10.13%

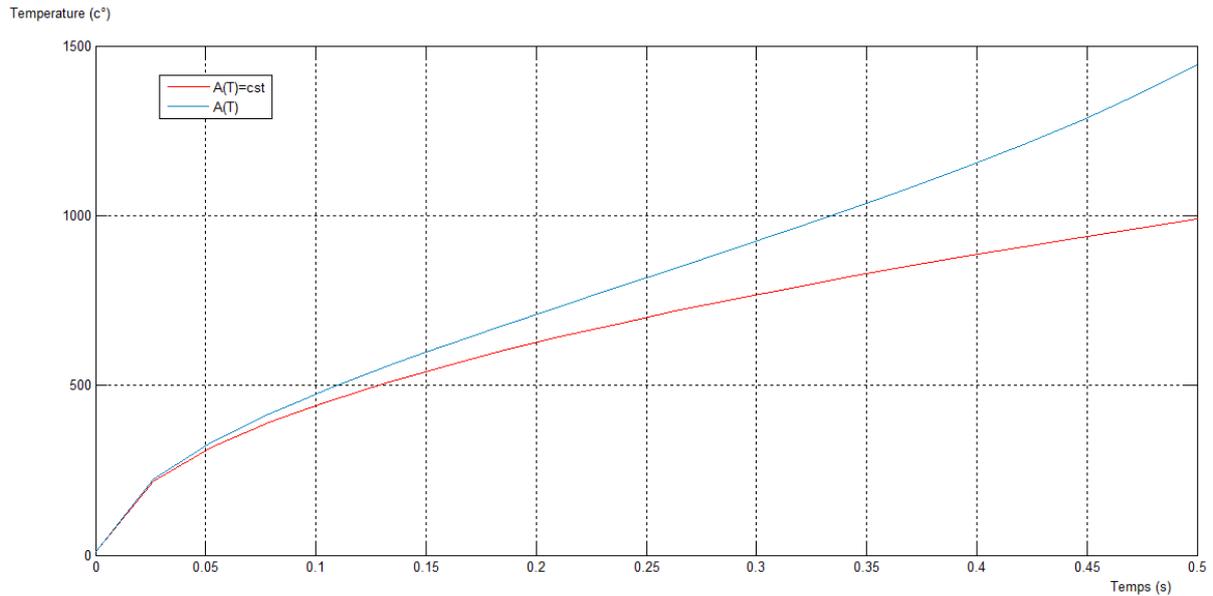
**Tableau III-1** : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

### III.6.1.2 Pour la source laser CO<sub>2</sub> Type exponentiel

Equation de :  $q = I_0 * \exp(0.005 * t) * A$

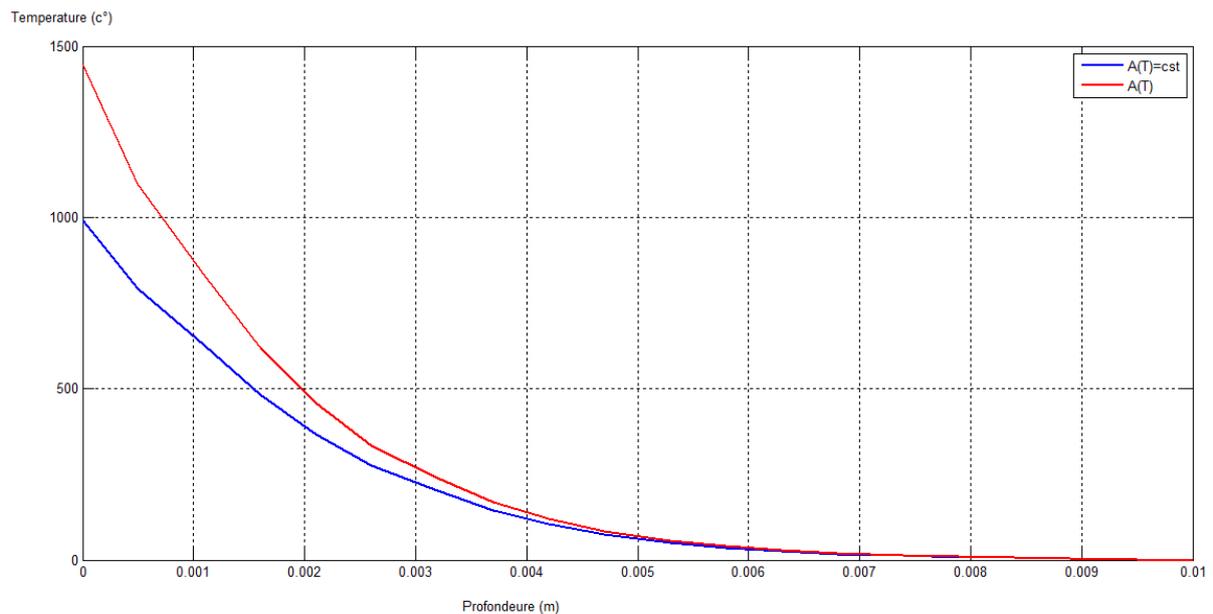
**B/pour :**

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0.295 \\ A(T) = (0.295 + 0.0000579 * T(0, t) - T_0 - 0.0000000.108 * (T(0, t) - T_0)^2 - 0.0000000000653 * (T(0, t) - T_0)^3) \end{array} \right.$$



**Figure III.5 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO<sub>2</sub> sans coefficient de convection

La figure III.5, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO<sub>2</sub>. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 0.5s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 31.41% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III.6:** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $\text{CO}_2$

La figure III-6, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser  $\text{CO}_2$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 31.41 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles pénètre la profondeur de la pièce voir le **Tableau III-2** cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Laser $\text{CO}_2$	A constante	A variable	pourcentage
Température (K) X= 00 mm	990.1937	1443.7	31.41%
Température (K) X=1.1 mm	623.8289	827.9	24.64%
Température (K) X=3.2 mm	201.5439	239.7	15.91%
Température (K) X=4.2 mm	104.1780	119.5	12.82%
Température (K) X=5.3 mm	51.7021	57.5	10.08%

**Tableau III-2 :** variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

### **III.6.2 Equation de l'absorptivité pour l'acier avec le coefficient de convection**

$$h = 1000$$

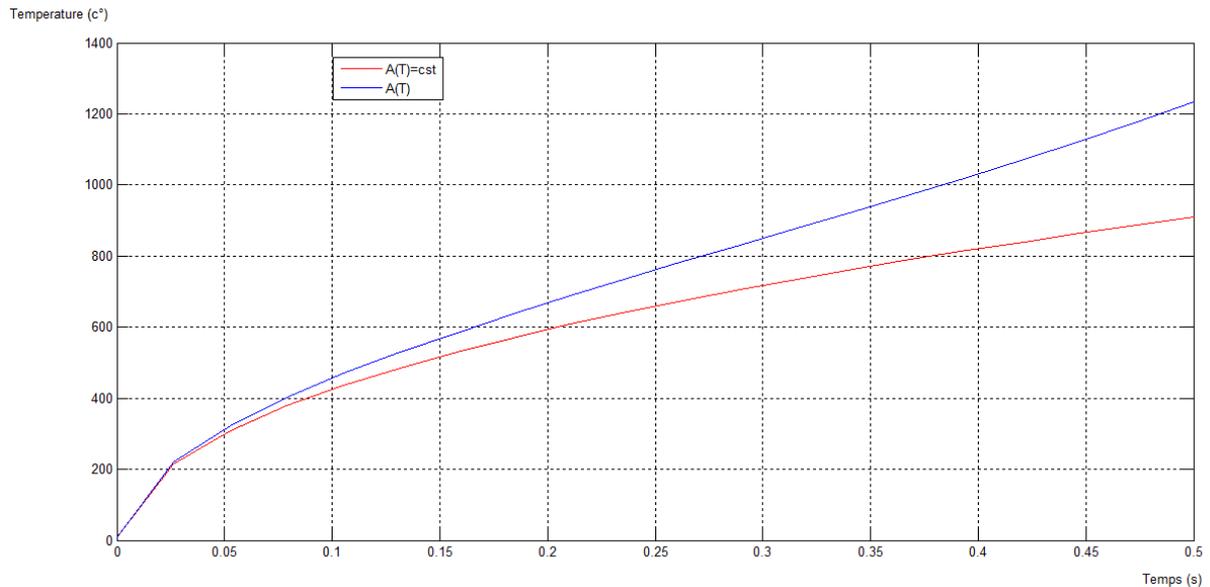
$$u_l = T(0,t) - T_0$$

#### **III.6.2.1 Pour la source laser $\text{CO}_2$ constante**

$$I_0 = \text{cst}$$

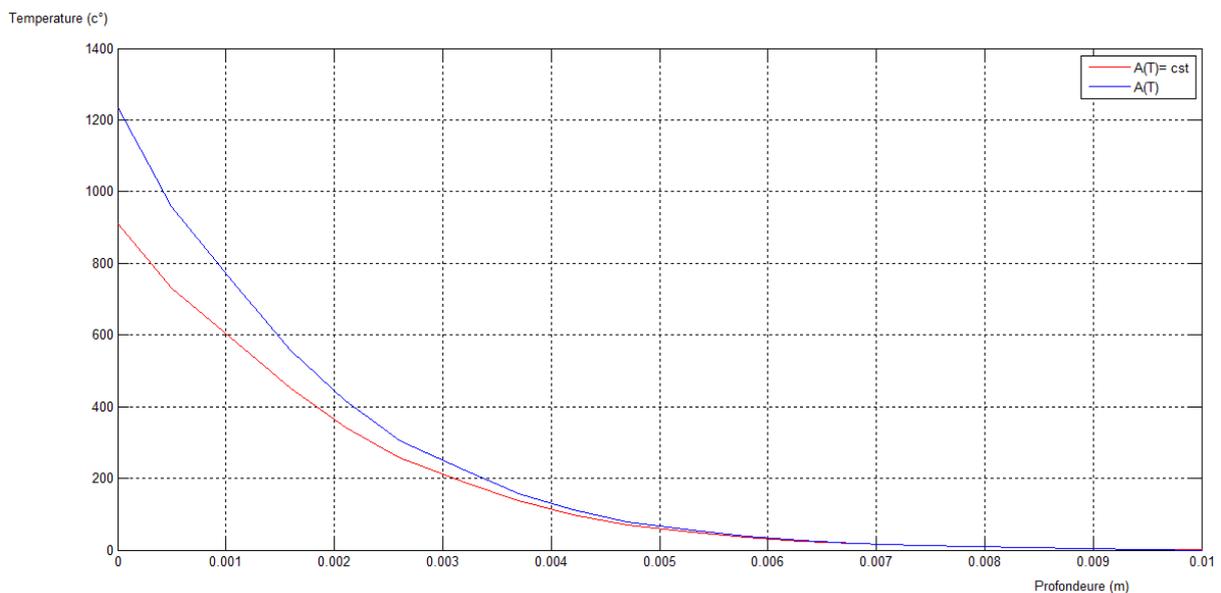
**C/pour :**

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0.295 \\ A(T) = (0.295 + 0.0000579 * T(0, t) - T_0 - 0.0000000.108 * (T(0, t) - T_0)^2 - 0.0000000000653 * (T(0, t) - T_0)^3) \end{array} \right.$$



**Figure III.7 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $CO_2$

La figure III.7, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser  $CO_2$ . Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 0.5s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 8.05% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III.8 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $CO_2$

La figure III-8, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO<sub>2</sub> la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 8.05 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles pénètre la profondeur de la pièce voir le **Tableau III-3** cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Laser Co <sub>2</sub>	A constante	A variable	Pourcentage
Température (K) X=00 mm	908.9541	988.5730	8.05%
Température (K) X=1.1 mm	578.3129	623.0074	7.17%
Température (K) X=3.2 mm	190.0326	201.3719	5.62%
Température (K) X=4.2 mm	99.0256	104.1075	4.88%
Température (K) X=5.3 mm	49.5773	51.6753	4.05%

**Tableau III-3** : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

### III.6.2.2 Pour la source laser Co<sub>2</sub>Type exponentielle

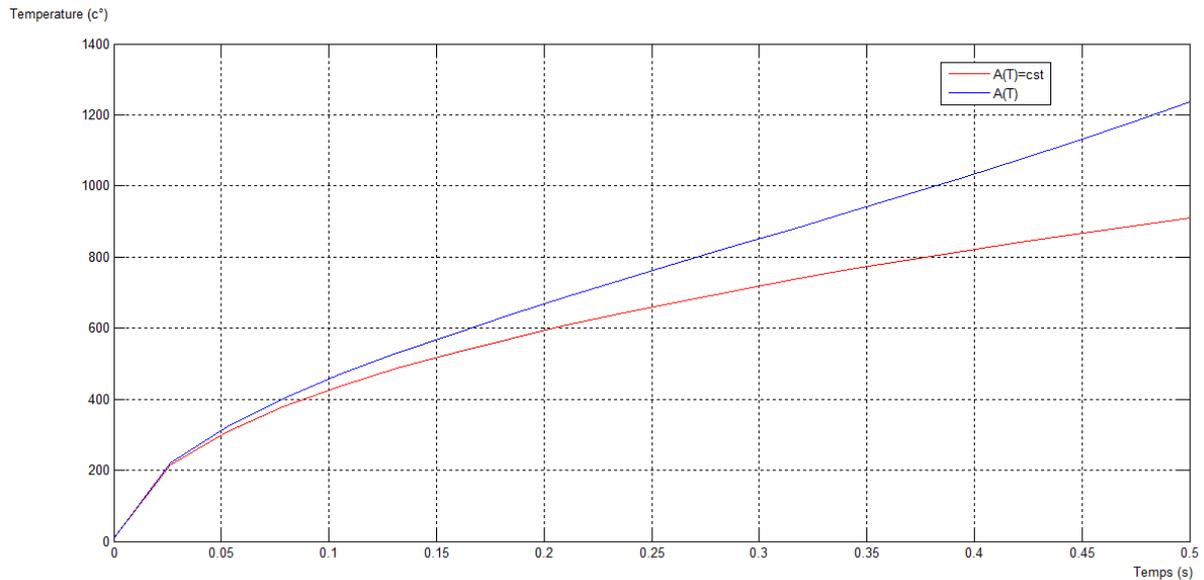
Equation de :  $q = I_0 \cdot \exp(0.005 \cdot t) \cdot A$

$$h = 1000$$

$$ul = T(0,t) - T_0$$

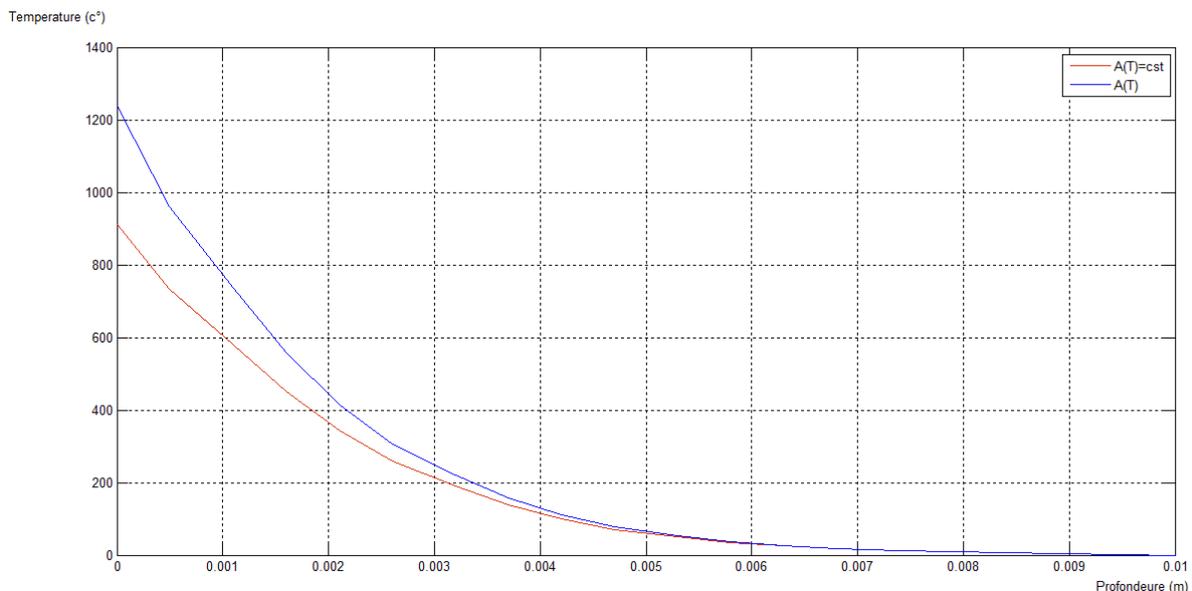
**D/pour :**

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0.295 \\ A(T) = (0.295 + 0.0000579 \cdot T(0, t) - T_0 - 0.0000000.108 \cdot (T(0, t) - T_0)^2 - 0.0000000000653 \cdot (T(0, t) - T_0)^3) \end{array} \right.$$



**Figure III.9 :** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO<sub>2</sub> avec coefficient de convection

La figure III.9, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO<sub>2</sub>. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 0.5$ s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 26.46% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III.10** : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenue à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser  $\text{CO}_2$

La figure III-10, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser  $\text{CO}_2$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 26.46 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce voir le **Tableau III-4** cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Laser $\text{Co}_2$	A constante	A variable	pourcentage
Température (K) X= 00 mm	910.4765	1238.1	26.46%
Température (K) X=1.1 mm	579.0884	735.8	21.29%
Température (K) X=3.2 mm	190.1964	221.9	14.28%
Température (K) X=4.2 mm	99.0930	112.2	11.68%
Température (K) X=5.3 mm	49.6030	54.7	9.31%

**Tableau III-4** : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

### III.7 Estimation de la profondeur traitée

Pour la source laser  $\text{CO}_2$  constante sans l'effet de la convection :

à $750\text{C}^\circ$	A constante	A variable
X traités (mm)	0.7	1.3

Pour la source laser  $\text{CO}_2$  exponentiel sans l'effet de la convection :

à $750\text{C}^\circ$	A constante	A variable
X traités (mm)	0.5	1.2

Pour la source laser CO<sub>2</sub> constante avec l'effet de la convection :

à 750C°	A constante	A variable
X traités (mm)	0.35	1

Pour la source laser CO<sub>2</sub> exponentiel avec l'effet de la convection :

à 750C°	A constante	A variable
X traités (mm)	0.4	1

### III.8 L'équation de la phase de refroidissement

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I_0(t)(1-R)\mu \exp(-\mu x) f(t) \quad \text{III 8}$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 & t \leq \tau \dots \dots \text{phase d'echauffement} \\ 0 & t > \tau \dots \text{phase de refroidissement} \end{cases}$$

#### III.8.1 Les conditions initiales et aux limites sont modélisées comme suit

$$T(x, 0) = T_{\max} \quad \text{III 9}$$

$$-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_{\infty} - T(0,t)] \quad \text{III 10}$$

$$\frac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0 \quad \text{III 11}$$

Le profil de température est donné.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre on à proposer un modèle qui permet de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme d'ordre 3 en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet de flux thermique laser imposé. Pour cela on à utiliser la commande pdepe sous Matlab pour résoudre notre modèle mathématique, on à étudier l'acier sous l'effet de laser  $\text{Co}_2$ , et on a conclu grâce au résultat que la température superficielle dans le cas de l'absorptivité variable  $A(T)$  augmente plus rapide par rapport à l'absorptivité constante  $A(T)=\text{cst}$  dans un temps réduite.

# **CONCLUSION GENERALE**

### **CONCLUSION GENERALE**

Le traitement thermique par laser influence sur l'énergie optique absorbée par le matériau : l'angle d'incidence, la longueur d'onde du laser, l'irradiance, la vitesse d'avance, le type du matériau et ses paramètres thermiques (capacité, conductivité, densité, diffusivité, et la résistivité électrique) et le fini de surface. L'impact réuni de ses facteurs prend part à la définition d'un coefficient d'absorption de la puissance optique du laser par la surface.

La plupart des travaux publiés considèrent l'absorptivité comme constante, après le processus de préparation de la surface, ou bien dans certains travaux limités, ou l'absorptivité dépendante de la température superficielle est utilisée sous une forme linéaire simple.

Le modèle numérique qu'on a proposé permet de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme de l'ordre 3, en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser.

La température superficielle dans le cas de l'absorptivité variable augmente par rapport au cas de l'absorptivité constante.

Pour résoudre notre problématique on a utilisé la commande pdepe sous Matlab qui résout les équations paraboliques et elliptiques. Les résultats sont relevés et discutés.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] : **F.Brtena et C.Drag**, « Cours de physiques des Lasers » version 1 ; Laboratoire Ainé.
- [2] : **Pierre ravussion**, et **Gilbert Mouthon**, «Introduction aux lasers » ; Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (Mars 2006).
- [3] : Dossier «Le Laser : un concentré de lumière» P.Stroppa, CEA 2015
- [4] : Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion: Nature 506, 343–348 (20 February 2014).
- [5] : **Rocca, J** ; P. (2008). Les Lasers en odontologie. France : Wolters Kluwer.
- [6] : Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane. **Marc Grenier**, 1998.
- [7] :**N. GUELAI, F. BOUTRFIF** ; « Comportements mécanique des aciers faiblement alliés avant et après cémentation » ; Mémoire de Master 2015/2016.
- [8] :**Pantelis D** ; « traitement superficiel par faisceaux à haute densité d'énergie » ; Technique d'ingénieur, Vol.AF3,N°M1240 ,(1993).
- [9] : **Desalos Y.** et **Lestart F** ; « traitement thermique superficiel des aciers » Technique d'ingénieur, Vol.MDI,N°.M1205,(1996).
- [10] : **Kikuchi, M ;Hisada, Kuroda, Y;Moristu, K** ; 1981 Proceedings of 1St join US/Japan International Laser Processing Conference, Toledo, OH : Laser institute of America. Paper No 12.
- [11] : **Bendahmane sara** ‘ ‘ Etude de fonctionnement dynamique d'un laser Co<sub>2</sub> avec un absorbant saturable ‘ ‘, (2012)
- [12] : **MEBARKI EL HOUARI , AYOUZ SYPHAX**: ‘ ‘ Trempe superficielle de l'acier par laser Nd:YAG ‘ ‘ ,. (2020)
- [13] : **kawasmi, H.**Metal surface hardening Co<sub>2</sub> laser. In source Book on Application of the laser in Metal working ; E.A ; E.d ; American Society for Metals : Metals Park, 185-194.

- [14] : **G. MURRY**, « Transformations dans les aciers, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M1115 », Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
- [15] : **YETTOU AISSA** "Transfert thermique non linéaire lors de l'interaction laser-matériau : analyse et modélisation". 2019/2020
- [16] : **Theodore L. and all**, « Fundamentals of heat and mass transfer » seventh edition, JOHN WILEY & SONS, (2011),pp.1047
- [17] : **A.M.deus et Villar** one-dimensional thermal model including dependence of absorptivity on temperature using Hagen-Rubens, institut supérieur technique de Lisbonne Portugal.
- [18] : Transfert thermique non linéaire lors de l'interaction laser-matériau : analyse et modélisation. **Université de A.MIRA Bejaia** 2019/2020
- [19] : **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.
- [20] : **Dabby. F.W et Paek. U.**,« High-intensity laser-induced vaporisation and explosion of solid materials», *IEEE J. Quantum Electron*, vol. *QE-8*, NO 2, (February 1972),pp. 106-111.
- [21] : **ION, J. C. et L. M. ANISDAHL**. 1997. « A PC-based system for procedure development in laser transformation hardening ». *Journal of Materials Processing Technology*, volume 65, numéro 1-3, pp. 261-267.
- [22] :] **S. MARTÍNEZ, E. UKAR, A. LAMIKIZ et F. LIEBANA**. 2010 « Laser hardening prediction tool based on a solid-state transformations numerical model ». *Dans International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*. (Paris, France, 24-27 Octobre 2010), pp. 1594-1599. Melville, New York: American Institute of Physics.
- [23] : **BOUAZIZ M. N. et BOUTALBI, N.**«Laser Heating of a Material with Time Dependent Laser Source». *International Journal of Thermophysics*, Vol. 32, No 5, (2011),pp .1047-1059.
- [24] : **Bessrou. Jet al.**, « Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source laser mobile » *Int.J of thermal science*, 41 (2002),pp.1055-1066.
- [25] : **D. KECHEMAIRE et E. LUNEVILLE** simulation numérique et contrôle de la trempe superficielle des aciers par laser CO2.

## **Résumé :**

Le traitement thermique superficiel par laser peut être introduit plus rapidement dans le sens de la recherche d'une précision rehaussée nécessite une commande de contrôle de processus, ce procédé n'a pas trouvé une solution adéquate par mesures expérimentales, ce qui encourage les chercheurs à développer plusieurs modèles mathématiques. D'ailleurs, la modélisation mathématique réduit le coût expérimental et prédit les meilleures données paramétriques et leurs influences pour l'optimisation de l'opération de traitement.

Le modèle numérique qu'on a proposé permet de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme de l'ordre 3, en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser imposé.

On a utilisé la commande pdepe sous Matlab, qui traite mieux ce genre de problème, en particulier pour la géométrie simple et régulière de la matière traitée

**Mots clés :** traitement thermique Superficiel, modélisation.

## **Abstract :**

Laser surface tempering of materials can be introduced more quickly, in the sense of reaching high accuracy, requires a control of processes. The latter has not provided experimentally a proper solution, which encouraged researchers to develop several mathematical models. Moreover, mathematical modeling reduces the experimental cost and predicts the best parametric data and their influence on the optimization of the processing operation.

The numerical model that we have proposed makes it possible to solve the non linear heat equation due to the temperature-dependent absorptivity under a polynomial of order 3, in transient regime in a one-dimensional domain under the effect of the heat flux laser imposed.

We used the pdepe command under Matlab, which deals better with this kind of problem, in particular for the simple and regular geometry of the material treated

**Keywords:** heat treatment of surface, modeling.