

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 : ENERGÉTIQUE

PAR :

MEBARKI EL HOUARI

AYOUZ SYPHAX

Thème

Trempe superficielle de l'acier par laser Nd:YAG

Soutenu le 25/10/2020 devant le jury composé de:

Mr. Ali Agha. H

Président

Mr. Boutalbi.N

Rapporteur

Mr. Hamdi. M

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

Remerciements

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous avons aussi le plaisir de remercier vivement notre encadreur Mr. Nadir BOUTALBI pour le suivi de notre avancement, et à tous le personnel du département génie mécanique.

En fin nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Dédicace

A mes chers parents pour leurs sacrifices et encouragements.

À mes chers copains de chambre, et mon binôme Mebarki Houari.

À mes chers amis Massi, Faycel, Imad,

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi tout deux soucieux de ma réussite

A tous les membres de ma famille, mes frères et sœurs mes cousins et mes voisins, mes collègues de travail.

Syphax

Dédicace

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude et en toute sincérité que je dédie ce modeste travail de fin d'études

A ma très chère famille, qui m'a apporté son soutien indéfectible et inconditionnel tout au long de mon parcours étudiant. Pour leur précieux et judicieux conseils, leur patience et compréhension, Je vous serai à tout jamais redevable.

A tous mes ami(e)s et camarades. Pour leurs encouragements et leurs soutiens qui m'ont été d'une aide précieuse.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

El Houari

Sommaire

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Dédicace	iii
Sommaire	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction général	1
Chapitre I : [Généralité sur les lasers].	
I.1. Le laser	2
I.2. Généralité historique sur les lasers	2
I.3. Principe de fonctionnement	3
I.3.1. caractéristique remarquable de la lumière laser	4
I.3.2. Type et mode de fonctionnement du laser	5
I.3.2.1. Types des lasers	5
I.3.2.2. Mode de fonctionnement des lasers	5
I.4. Interaction laser matière et applications à l'usinage.....	6
I.5. Traitement thermique superficiel par laser	7
I.5.1. Modification de microstructure sans apport de matière	7
A) Trempe superficielle	7
B) Fusion superficielle	8

Sommaire

C) Traitement avec vaporisation	9
I.5.2. Modification de microstructure avec apport de matière	9
A) Formation d'un revêtement	9
B) Formation d'un composite superficiel	10
C) Formation d'un alliage superficiel	11
I.6. Place et enjeux de trempe superficielle de l'acier au laser	13
I.6.1. Cycle thermique de trempe superficielle au laser.....	14
I.6.2. Diagramme Fe-C	15
I.7. Contrôle de processus de trempe superficielle au laser	16
I.8. Conclusion	17
Chapitre II : [Synthèse Bibliographique]	
II.1. Généralités sur la modélisation et la simulation	18
II.1.1. Définition de la modélisation	18
II.1.2. La simulation	19
II.2. Modélisation et simulation de trempe au laser	20
II.3. Difficultés de la trempe au laser	21
II.4. Conditions aux limites spatiales et temporelles	21
a) Conditions initiales	21
b) Conditions aux limites	22
II.5. Modèles Mathématiques la trempe au laser	23
II.5.1. Modèles analytiques	23
II.5.2. Modèles numériques	24

Sommaire

II.5.3. Modèles de simulation	25
II.6. Conclusion	26
Chapitre III : [Modélisation Mathématique]	
III.1. Introduction.....	28
III.2. Description du modèle	28
III.2.1. Hypothèses simplificatrices	28
III.2.2. Formulation des équations	29
III.2.3. Condition initiales et aux limites	29
III.3. Description de la méthode de résolution (pdepe).....	30
III.4. Sensibilité de l'absorptivité de l'acier a la température	32
III.5. Résultats et discussion.....	34
III.6. Conclusion.....	40
Conclusion Générale.....	42

Table des figures

Figure I.1: Theodore Maiman avec son premier laser à rubis	3
Figure I.2 : Schéma d'une cavité diode laser	3
Figure 1.3 : Fusion superficielle par irradiation laser	8
Figure 1.4 : Formation d'un revêtement de surface avec pré-dépôt d'un matériau d'apport ...	10
Figure 1.5 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser	10
Figure 1.6 : Formation d'un composite superficiel	11
Figure 1.7 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif	11
Figure 1.8 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives	12
Figure 1.9 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré-dépôt d'éléments d'addition	12
Figure I.10 : cycle de traitement thermique superficiel crée par un laser.....	15
Figure I.11 : Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe ₃ C.....	16
Figure II.1 : Exemples de conditions aux limites	23
Figure III.1 : Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser	28
Figure III.2 : Montage expérimental pour mesurer l'absorbance.....	33
Figure III.3 : Absorption des métaux pour un faisceau de 1,07 mm avec une température allant jusqu'au point de fusion.....	34
Figure III.4 : Polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour l'acier AISI304	34
Figure III.5 : profile de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à A=1, A(T), et A=cst pour l'acier AISI304 sous l'effet thermique de laser Nd:YAG.....	35

Table des figures

Figure III.6 : Profile de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = 1$, $A(T)$ et $A=cst$, pour l'acier AISI304 sous l'effet thermique du laser Nd:YAG.....	36
Figure III.7 : profile de température superficielle en fonction du temps obtenue à $q=1e7$, $q=2e7$ et $q=3e7$ pour l'acier inoxydable AISI304.....	37
Figure III.8 : profile de température superficielle en fonction de la profondeur obtenue à $q=1e7$, $q=2e7$ et $q=3e7$ pour l'acier inoxydable AISI304.....	38
Figure III.9 : profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=1e7$ pour l'acier inoxydable AISI304.....	39
Figure III.10 : profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=2e7$, pour l'acier inoxydable AISI304.....	39
Figure III.11 : profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=3e7$, pour l'acier inoxydable AISI304.....	40

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'usinage	6
Tableau I.2 : Comparaison entre trempe au chalumeau, trempe par induction et trempe au laser.....	13
Tableau III.1 : Caractéristique de l'acier inoxydable AISI 304	29
Tableau III.2 : Propriétés du matériau du substrat utilisé dans le calcul	29
Tableau III.3 : variation de la profondeur pour $T=700$ pour les trois cas de l'intensité q	40

Nomenclature

NOMENCLATURE

Symbole	Définitions	Unité (SI)
C_p	Capacité thermique	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	°C
x	Distance	m

Symboles grecs	Définition	Unité (SI)
β	Paramètres de la pulsation de la source laser	s^{-1}
ρ	Densité	Kg/m^3
α	Diffusion thermique	m^2/s

Introduction Générale

Introduction Générale

Le laser est devenu l'une des bases de la technologie moderne, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser, ce que les autres sources d'énergie sont incapables de le faire, en particulier dans le traitement thermique des matériaux.

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

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

Le second chapitre est consacré 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, les modèles mathématiques de la trempe au laser, les paramètres influencent l'absorptivité laser, et en fin les modèles de trempe superficielle par laser selon l'effet non linéaire de l'absorptivité Température dépendante.

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

Chapitre I

Généralité sur les lasers

I.1 Le laser :

Le mot laser, s'il est devenu un terme commun, est à l'origine un acronyme pour « Light amplification by stimulated emission of radiation » c'est-à-dire « Amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement »

I.2 Généralités historiques sur les lasers :

- 1900 Max Planck suggère que l'échange d'énergie entre les ondes et la matière est discontinu et se fait par « grains » de rayonnement : les quanta d'énergie.
- 1913 Niels Bohr introduit la notion de niveaux d'énergie des atomes pour rendre compte de l'émission de quanta d'énergie.
- 1916-1917 Albert Einstein décrit et quantifie l'absorption de rayonnement et l'émission spontanée.
- 1917 Einstein ajoute aux deux processus précédents un nouveau mode d'interaction atome-lumière : l'émission stimulée.
- 1950 Alfred Kastler met au point la méthode dite du pompage optique.
- 1953-1954 Un appareil capable d'amplifier les micro-ondes à l'aide de l'émission stimulée, appelé maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), est mis au point, indépendamment, par deux équipes de chercheurs : d'une part, par les Américains Charles H. Townes et Arthur L. Schawlow ; d'autre part, par les Soviétiques Alexandre Prokhorov et Nicolai Basov.
- 1958 Arthur L. Schawlow et Charles H. Townes publient les principes de réalisation d'un appareil analogue au maser mais qui est capable cette fois d'amplifier la lumière. Pour cette raison, ils le nomment maser optique. Cette dénomination a ensuite été progressivement abandonnée au profit du mot « laser » (*light amplification by stimulated emission of radiation*), terme inventé en 1957 par le physicien américain Gordon Gould. En effet, après trente ans de litige, il a été reconnu que Gould avait défini dès 1957 – dans un travail non publié ni breveté, mais enregistré – les principes essentiels de réalisation des lasers. Le premier laser a vu le jour en mai 1960, dans un petit laboratoire industriel à Malibu en Californie. Il s'agissait d'un laser à rubis Figure I.1, fonctionnant en impulsions dans le rouge. Son inventeur, **Theodore Maiman**, [1,2].

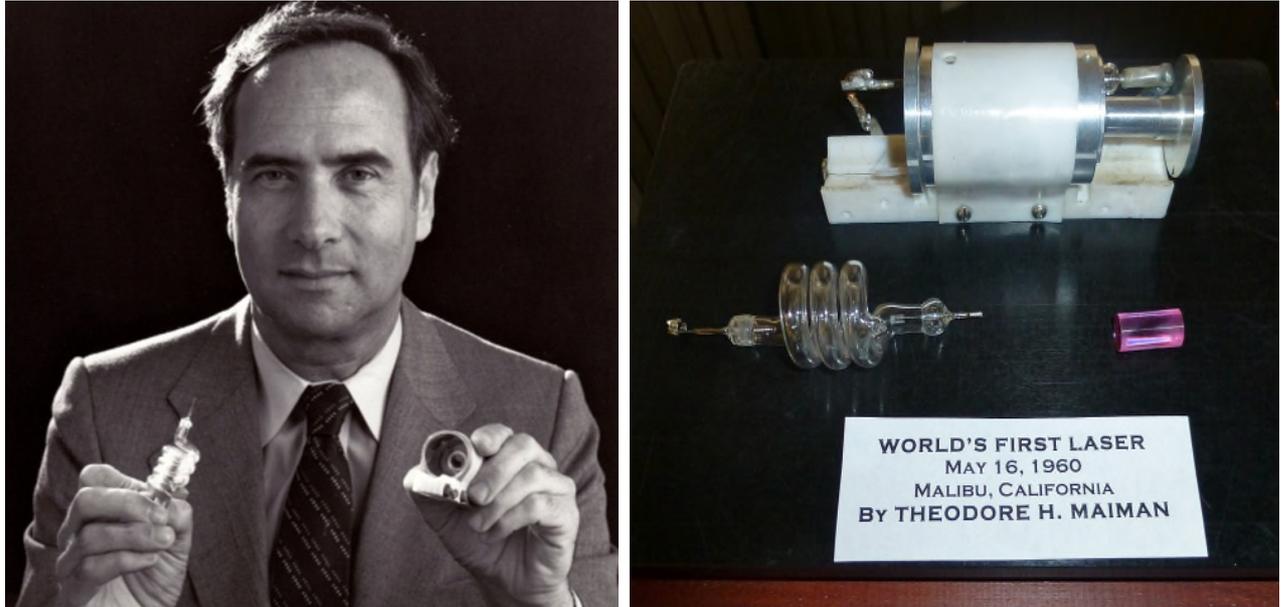


Figure I.1: Theodore Maiman avec son premier laser à rubis, [3].

Plus tard en 1963, le laser au dioxyde de carbone (CO_2) est mis au point par Kumar Patel chez AT&T Bell Labs. Le laser CO_2 est beaucoup moins onéreux et beaucoup plus efficace que le laser au rubis. Ces facteurs en ont fait le type de laser industriel le plus plébiscité depuis plus de 50 ans.

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, et qui es peut être schématisé de la façon suivante (figure I.2), [4].

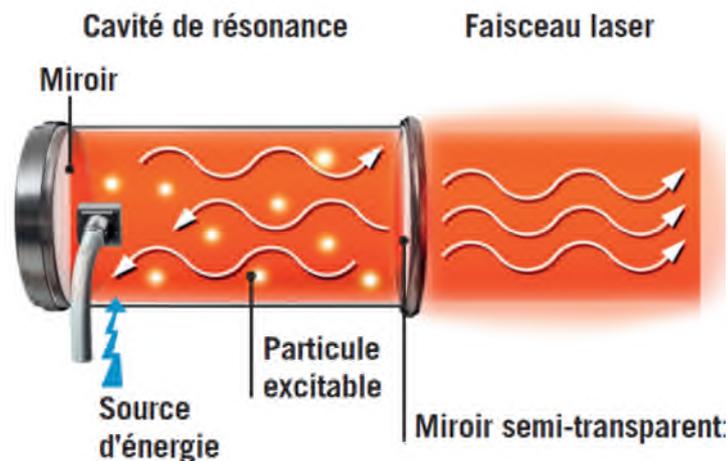


Figure I.2 : Schéma d'une cavité diode laser, [5].

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, [5].

I.3.1 Caractéristiques remarquables de la lumière laser :

- **Mono-chromaticité :** La lumière issue d'un laser est pratiquement monochromatique (longueur d'onde très précise).
- **Cohérence :**
 - l'émission de lumière par un laser s'effectue par des trains d'onde très longs, beaucoup plus longs que ceux «émis par une source ordinaire (bonne cohérence temporelle). Cela joue sur la mono chromaticité.
 - Cette lumière laser a également une grande cohérence spatiale : deux points de la source placés normalement à la direction de propagation produisent des vibrations lumineuses en accord de phase.
- **Directivité :** Les lasers émettent de par leur nature un rayonnement directif alors que les sources conventionnelles émettent dans toutes les directions de l'espace. Améliorer la directivité (par des composants optiques comme des lentilles) ne peut se faire qu'au détriment de l'intensité (ces composants absorbant une partie de la lumière).

La directivité d'une source est caractérisé par l'intensité énergétique $I(W)$ définie par :

$$dI = I(W).dW \quad 1.1$$

dI : intensité lumineuse (en $W.m^{-2}$) émise dans l'angle solide dW en stéradians.

Puissance : La puissance des lasers est très variable. Faible (quelques MW) ou moyenne pour des lasers à fonctionnement continu (excités, par une décharge électrique continue : DEC) elle peut devenir très grande pour des lasers fonctionnent par impulsion (excité par des décharge électrique impulsionnelles : DEI) et atteindre 10^6 w, voire 10^{15} W, pendant des durées très brèves (10^{-12} s), [4].

I.3.2 Types et mode de fonctionnement du laser :

I.3.2.1 Types des lasers :

Les lasers peuvent être divisés en groupe selon différents critères :

1. L'état du milieu actif : solide, liquide, gaz, ou plasma.
2. La gamme spectrale de la longueur d'onde de laser : spectre évident, spectre (IR)...
3. La méthode d'excitation (pompage) de milieu actif : pompage optique, pompage électrique, ect...
4. Selon les conditions de sécurité (classe 1, 2, 3A, et B).

Généralement la classification de la source laser est faite selon la nature du milieu actif.

I.3.2.2 Mode de fonctionnement des lasers :

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. Etant 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).

Caractéristiques	Lasers		
	CO ₂	Nd ⁺³ -YAG	Excimères
Longueur d'onde (µm)	10,6 IR lointain	1,06 proche IR	0,193 à 0,351 proche UV
Nature de milieu actif	gaz : CO ₂	solide : Nd-YAG	gaz : dimères
Mode de fonctionnement	Continu (impulsionnel)	pulsé (impulsionnel)	Impulsionnel
Puissance moyenne (W)	100 à 25 000	10 à 1 200	30 à 750

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'usinage [4]

I.4 Interaction laser matière et applications à l'usinage :

D'une façon générale, un rayonnement laser intense induit, sur un matériau solide, de nombreux phénomènes complexes et interdépendants. Ces phénomènes sont de nature :

- **Thermique** : chauffage, fusion, vaporisation de surface, ionisation du milieu environnement.
- **Mécanique** : impulsion mécanique due a la mise en mouvement d'ondes hydrodynamiques entretenues par le rayonnement laser.
- **Photochimique** : provoquent des perturbations des liaisons inter atomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide-gaz.
- **Optique** : réflexion spéculaires ou diffuses.
- **Electromagnétique** : génération de forts courant de retour et donc de champs électriques et magnétiques importants engendré par les écoulements à grande vitesse des gaz totalement ou partiellement ionisés.
- **Radiative** : absorption importante et rémission par plasma d'une partie de l'énergie laser.

L'existence et l'importance relative de chacun de ces phénomènes dépendent de nombreux paramètres :

- **Paramètres liés au faisceau laser** : (longueur d'onde, temps d'interaction, densité de puissance délivrée, vitesse de balayage du faisceau, angle d'incidence).

- **Paramètres liés au matériau** : nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physique (optique, thermique), état de surface (nature chimique, rugosité).
- **Paramètres liés de l'environnement** : (nature et pression de l'atmosphère de traitement).

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'application industrielle, comme le perçage, le découpage, le soudage, et les traitements superficiels, [4].

I.5 Traitement thermique superficiel par laser

I.5.1 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 resolidification 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. 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.

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 1.3**).

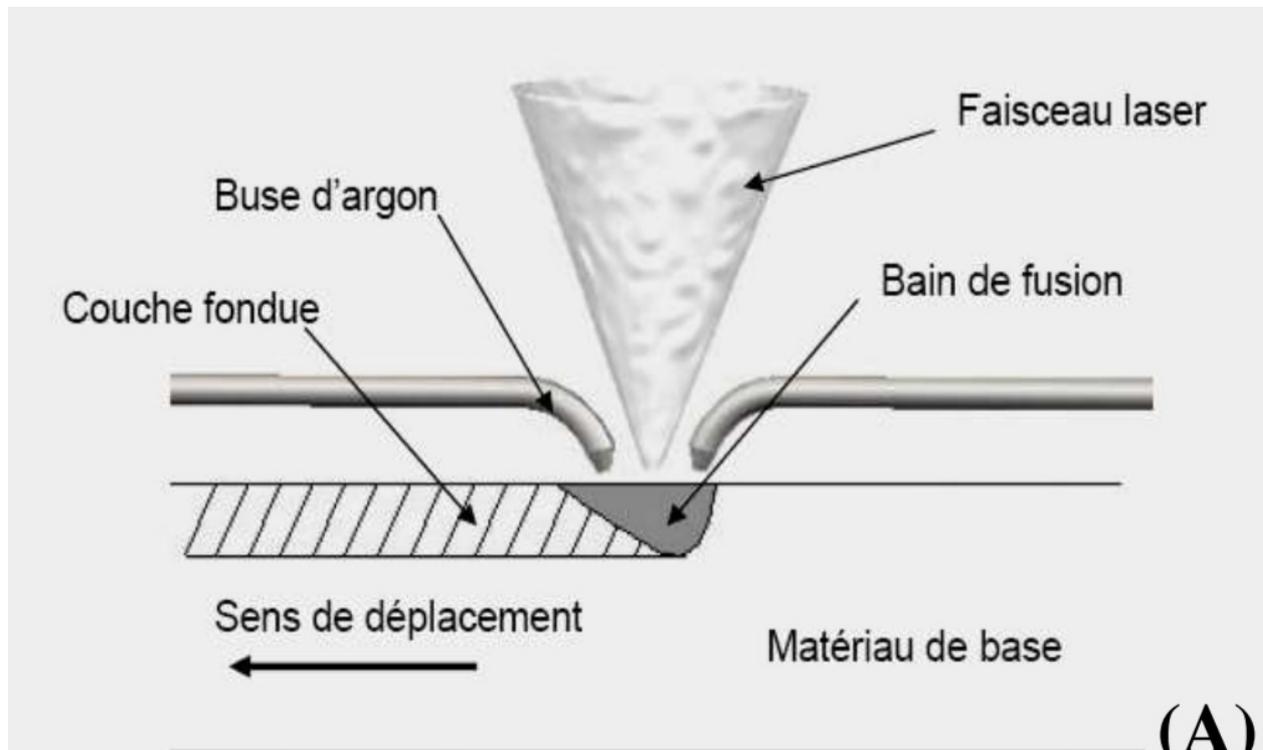


Figure 1.3 : Fusion superficielle par irradiation laser.

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 (CO_2 , Nd-YAG, excimère), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10^6 à $10^{11} \text{ W.cm}^{-2}$) pendant des impulsions de courte durée (10^{-8} à 10^{-6} seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface. 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.5.2 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 1.4**) ou bien il est injecté à l'état de poudre (**Figure**

1.5) 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 stellitage de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur.

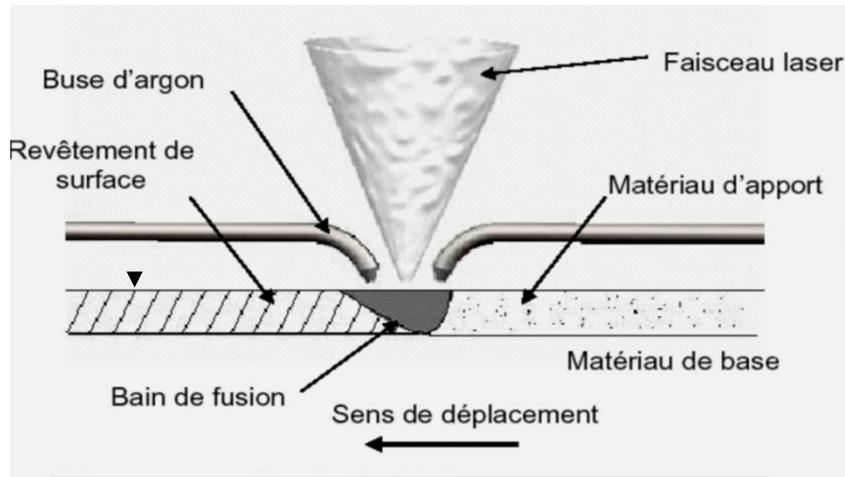


Figure 1.4 : Formation d'un revêtement de surface avec pré-dépôt d'un matériau d'apport

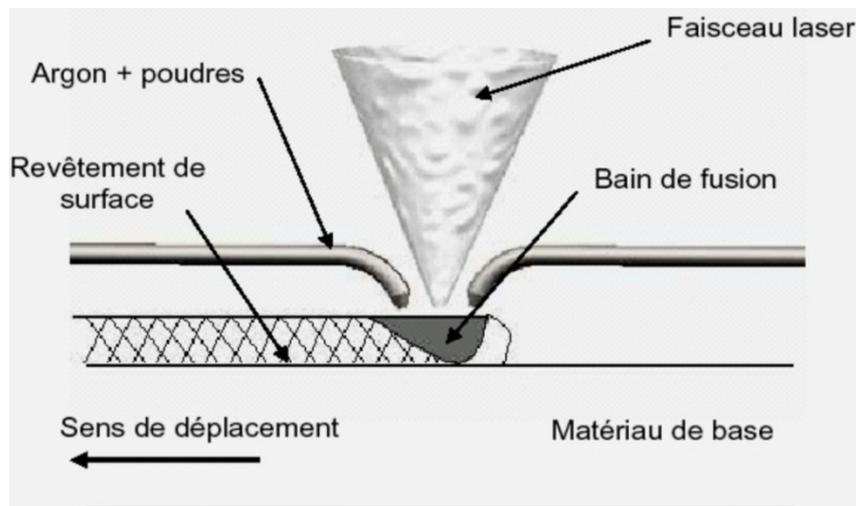


Figure 1.5 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser.

B) Formation d'un composite superficiel :

Des particules de renfort sont injectées dans le métal fondu superficiellement. Ces particules s'incrudent, 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 1.6**).

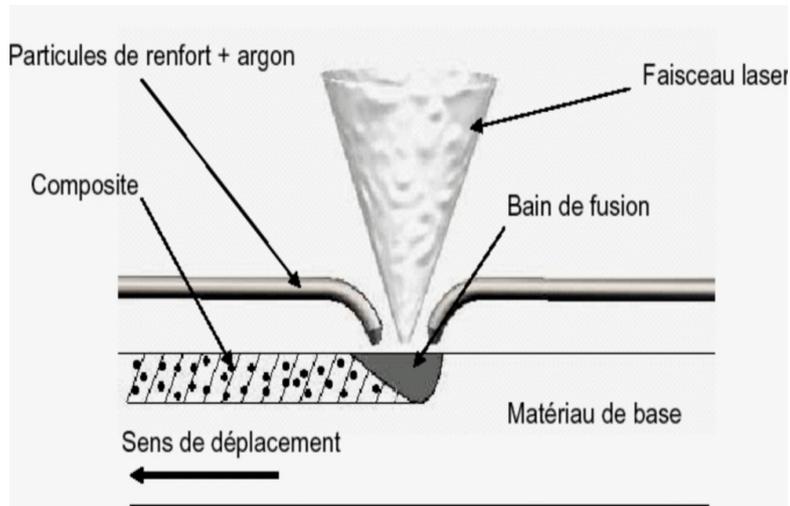


Figure 1.6 : Formation d'un composite superficiel.

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 1.7**) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (**Figure 1.8**) ou déposé préalablement (**Figure 1.9**), afin de former un alliage de surface après solidification.

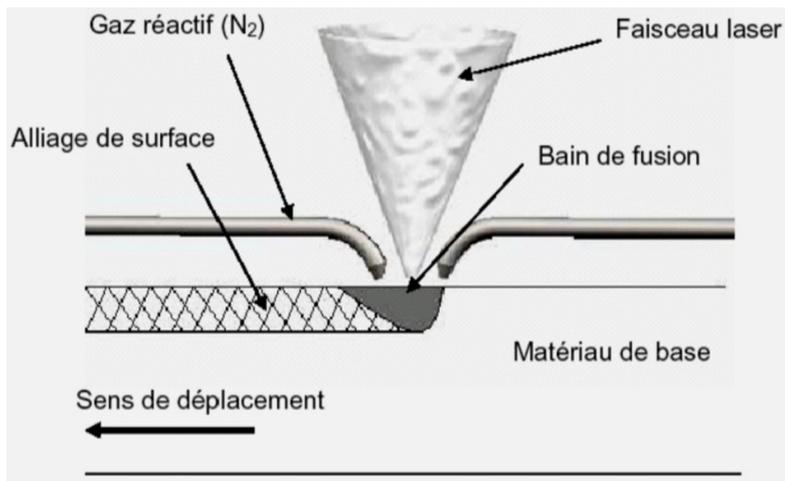


Figure 1.7 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.

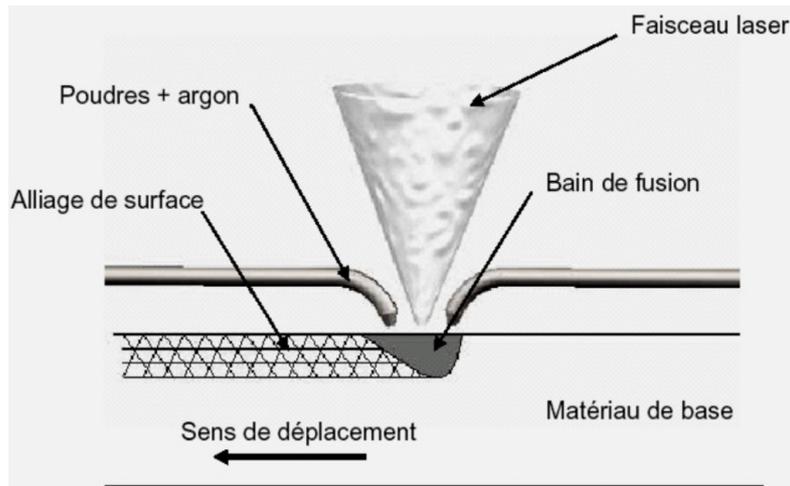


Figure 1.8 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.

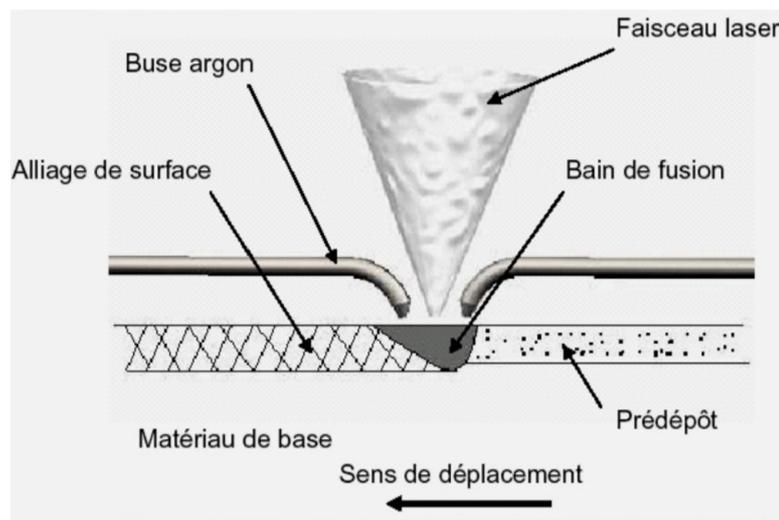


Figure 1.9 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré dépôt d'éléments d'addition

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 résistant 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, [6].

I.6 Place et enjeux de trempe superficielle de l'acier au 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.

Trempe au chalumeau	Trempe par induction	Trempe au laser
pièce de moyenne à grande taille, 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, très faibles déformations, profondeur de trempe limitée
installation spéciales et innovantes	parc machines innovant et dans l'état actuel 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.

I.6.1 Cycle thermique de trempe superficielle de l'acier :

Les alliages fer-carbone (aciers, à l'exclusion des alliages dits austénitiques) ont la remarquable aptitude de durcir après un traitement comprenant un chauffage au dessus d'une température critique (comprise entre 750 et 1200°C, variable selon la composition) appelé austénitisation (opérant une transformation de la structure cristalline du fer de la forme α à la forme γ) suivi d'un refroidissement rapide ou trempe à une vitesse supérieure à une vitesse critique dite vitesse critique de trempe martensitique, figure I .10 . La structure obtenue après trempe est une martensite constituée d'une solution solide de fer α modifiée par sursaturation du carbone.

Ce type de traitement peut être caractérisé par six paramètres principaux, [4] :

- **L'intensité énergétique des faisceaux** : il a une influence sur le profile de température ainsi que sur la profondeur de pénétration.
- **Le temps d'interaction τ** : c'est le temps duquel un élément de surface atteint les transformations structurelles.
- **Le gradient thermique** : le principe même du traitement veut que la température maximale atteinte soit au voisinage de la température de fusion (traitement en phase solide), ceci limite le temps d'interaction.
- **Vitesse d'échauffement V_c**
- **Vitesse de refroidissement V_r**
- **La surface irradiée**

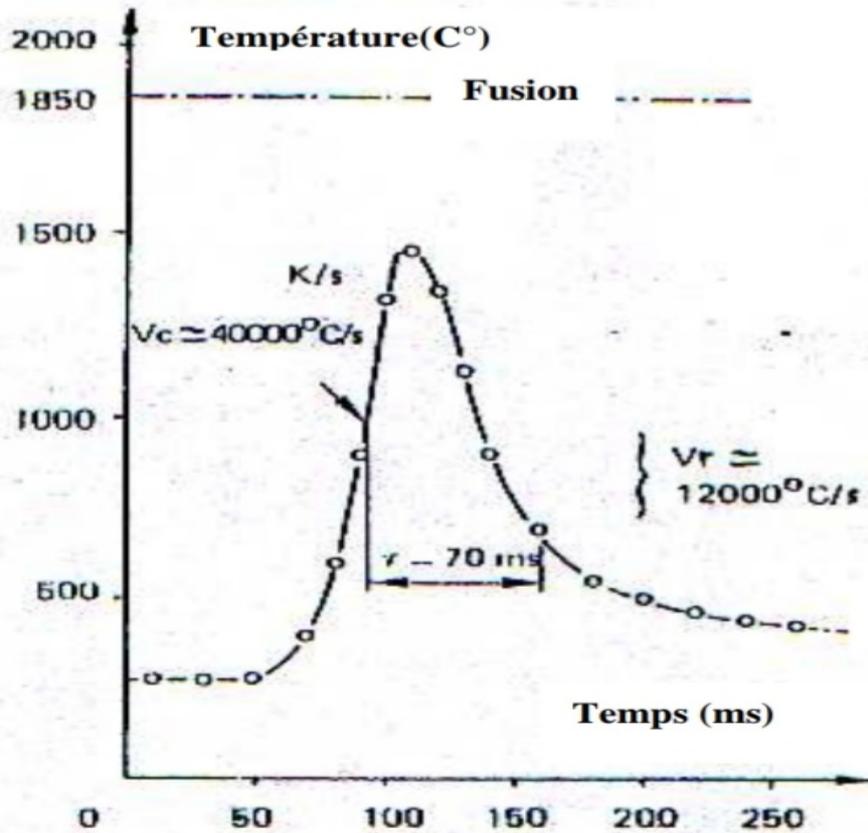


Figure 1.10 : cycle de traitement thermique superficiel créé par un laser, [4].

I.6.2 Diagramme fe-C :

✓ Diagramme stable- diagramme métastable :

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- La première produit une phase riche en carbone de formule Fe_3C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur C_{gr} , qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe_3C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium [7] .

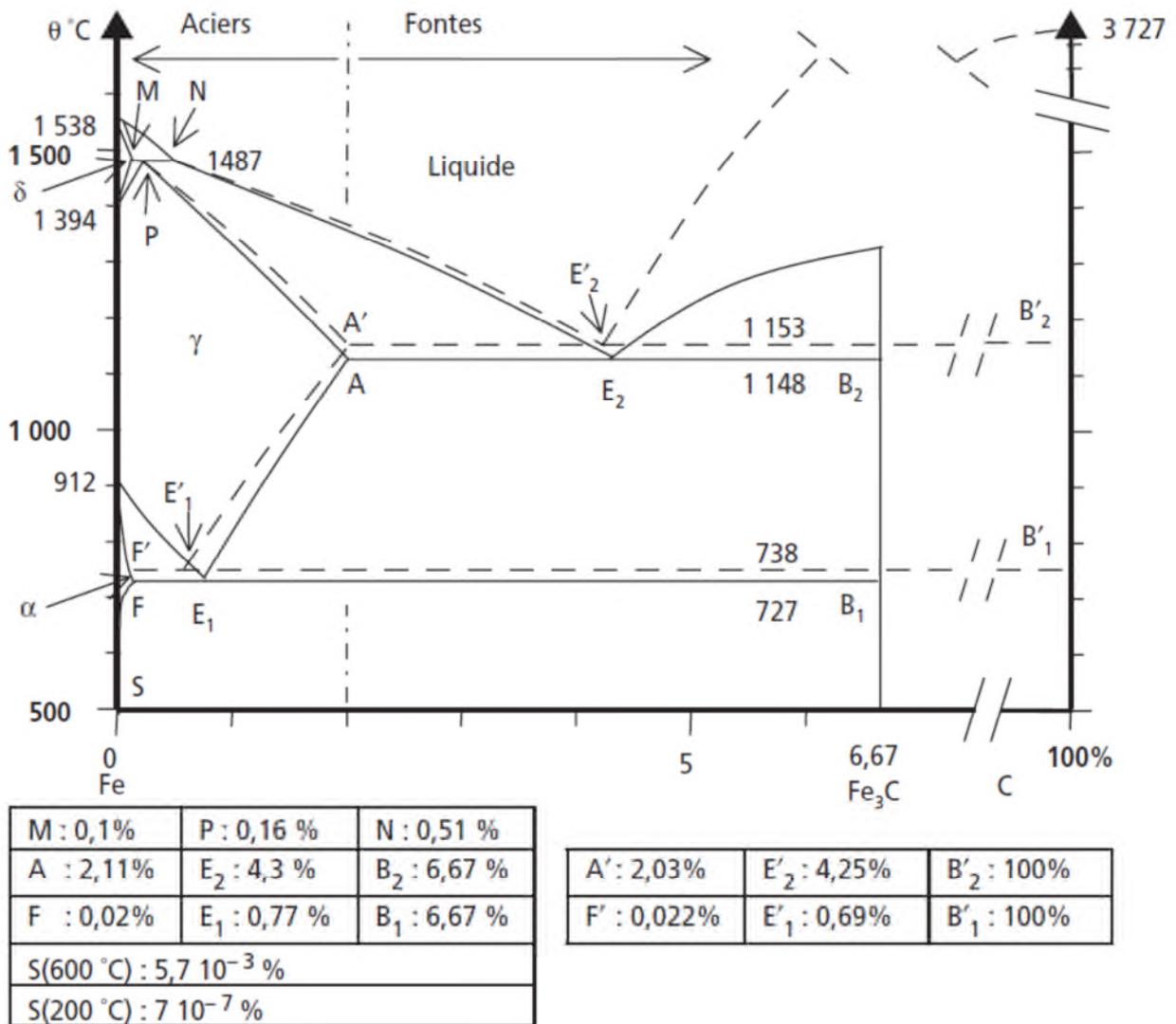


Figure I.11 : Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe-Fe₃C, [7].

I.7 Contrôle de processus de trempe superficielle au laser :

Pour obtenir le durcissement superficiel avec une bonne qualité, il est nécessaire de contrôler l'évolution de la température spatiale et temporelle, Le besoin d'atteindre rapidement la plus haute température sur la surface rend le contrôle de la température très important.

En outre les applications peuvent être introduites plus rapidement dans le sens rechercher avec une précision rehaussée à l'aide d'une commande de contrôle de processus.

Plusieurs méthodes expérimentales utilisant des appareils et des méthodes techniques pour déterminer le profil de température ainsi que la microstructure du durcissement.

L'une de ces méthodes est l'usage des thermocouples, cameras infrarouges

A coté de ces techniques expérimentales, qui présentent des inconvénients considérables.

- Ceux sont des techniques coûteuses (problèmes économiques).
- Difficile de mesurer la température en profondeur
- Certaines grandeurs ne peuvent tout simplement pas être connues ou alors de manière très indirect (gradient thermique, la vitesse local de refroidissement, le temps local de solidification.....)

La modélisation mathématique trouve la solution pour ces problèmes, avec un bas coût et une prédiction des connaissances des meilleures propriétés qui peuvent résulter au stade de développement du produit, [4].

I.8 Conclusion :

Les lasers trouvent des applications larges dans l'industrie de la métallurgie surtout le durcissement superficiel des métaux, le problème de contrôle de ce processus qui n'a pas trouvé une solution final par les appareils de mesure expérimentales, ce qui encouragent les spécialistes à développer plusieurs modèles mathématiques, selon des hypothèses simplificatrices logiques avec une description probable des effets induits et gouvernantes des phénomènes de traitement thermique. Ceci a permis de calculer les profils spatiaux et temporels de température ainsi que d'autres grandeurs thermiques.

Chapitre II

Synthèse bibliographique

II .1 Généralités sur la modélisation et la simulation :

La modélisation mathématique s'appuie principalement sur un (ou plusieurs) modèle(s). Le modèle est une représentation abstraite de la réalité au sens où il simplifie cette réalité en vue d'une utilisation précise, pour n'en conserver que les caractéristiques intéressantes par rapport au contexte ou au domaine dans lequel on se trouve. Le modèle est donc une vue subjective mais pertinente de la réalité. Un bon modèle doit être prédictif, c'est-à-dire qu'il doit permettre de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. Cette prédictibilité peut avoir un caractère qualitatif ou quantitatif selon que le modèle se contente de prévoir un certain comportement ou qu'il permet de prédire la valeur de telle ou telle grandeur mesurable. Le développement, l'optimisation et le contrôle de la qualité du procédé du T.T.L nécessitent l'évaluations des flux de chaleur et la répartition de température qui peuvent jouer un rôle essentiel dans la formulation des microcontrôleur, dans la formation de phase à l'état solide ou encore dans les contraintes résiduelle, [8].

II .1.1 Définition de la modélisation:

La modélisation est la conception d'un modèle. Selon son objectif et les moyens utilisés, la modélisation est dite mathématique, géométrique, 3D, empirique, mécaniste (ex : modélisation de réseau trophique dans un écosystème), cinématique... Elle nécessite généralement d'être calée par des observations ou mesures faites in situ, les quelles servent aussi à paramétrer, calibrer ou ajuster le « modèle », par exemple en intégrant des facteurs d'influences qui s'avèreraient nécessaires, [9].

✓ Les grandes étapes de la modélisation :

La modélisation se déroule en 5 grandes étapes :

- On se fixe les objectifs de la modélisation
- On fait l'inventaire des informations
 - données externes (loi, théorie, bibliographie)
 - axiomes (vérités indémontrables)
 - hypothèses
 - données expérimentales

Chapitre II : synthèse bibliographique

- 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

Compte tenu des interactions entre ces différentes étapes, le processus est itératif

✓ **Les objectifs de la modélisation :**

La modélisation peut avoir trois objectifs :

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

Selon que l'on souhaite parvenir à l'un ou l'autre de ces objectifs, la modélisation sera réalisée selon des modalités différentes.

II.1.2 La simulation :

La simulation consiste à utiliser le système secondaire pour générer les nouvelles valeurs.

✓ **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.

✓ **catégories de simulations :**

- a) La simulation continue:

Où le système se présente sous la forme d'équations différentielles à résoudre. Elle permet de suppléer à la résolution analytique quand celle-ci est impossible. Effectuée au départ sur des calculateurs analogiques, elle s'est effectuée aussi sur des ordinateurs ainsi que des machines hybrides, et un troisième type de calculateurs qui n'a pas eu de lendemain, les calculateurs stochastiques.

b) La simulation discrète :

Dans laquelle le système est soumis à une succession d'évènements qui le modifient. Ces simulations ont vocation à appliquer des principes simples à des systèmes de grande taille. La simulation discrète se divise en deux grandes catégories :

- synchrone ou time-slicing :

On simule à chaque fois le passage d'une unité de temps sur tout le système. Ce terme n'est généralement plus utilisé dans le domaine professionnel depuis l'apparition croissante des nouvelles technologies.

- asynchrone ou event-sequencing :

On calcule l'arrivée du prochain événement, et on ne simule qu'un événement par événement, ce qui permet souvent des simulations rapides, bien qu'un peu plus complexes à programmer.

c) La simulation par agents :

Où la simulation est segmentée en différentes entités qui interagissent entre elles. Elle est surtout utilisée dans les simulations économiques et sociales, où chaque agent représente un individu ou un groupe d'individus. Par nature, son fonctionnement est asynchrone.

✓ 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 ;
- Simulation atomistique en physique des matériaux ;
- Méthode de Monte-Carlo en physique statistique, physique des matériaux, physique nucléaire, physique des particules, mathématiques, statistiques et économétrie ;

II.2 Modélisation et simulation de trempe au laser :

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.

II.3 Difficultés de la trempe au laser :

Beaucoup d'applications requièrent le recouvrement de surface beaucoup plus grande que la taille de la tache focale. Une solution possible est d'effectuer plusieurs passages adjacents de manière à couvrir la surface requise, mais cette approche n'est pas idéale, car elle apporte des problèmes de revenu entre chacune des bandes de trempe créées. En effet, lorsque la bande précédemment traitée est réchauffée au-delà d'une certaine température (ACI), les mécanismes de transformation peuvent être réactivés et menés à une baisse de la dureté. Ces zones peuvent être une source de problème pour plusieurs applications, car ces zones seront sujettes à des capacités mécaniques et tribologiques réduites. Pour remédier à cette problématique, l'utilisation d'un scanneur permet de couvrir une plus grande surface en un seul passage.

II.4 Conditions aux limites spatiales et temporelles :

a) 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, [12].

b) 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 (cf. figure II.1).

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.

$$T_s = f_s(M_s, t) \quad \text{avec } M_s \text{ point de la surface du système} \quad \text{II.1}$$

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

- 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

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

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

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

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} |_s = h(T_s - T_{\text{amb}}) \quad \text{II.3}$$

avec h : coefficient d'échange thermique superficiel (en $\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$)

T_{amb} : température de référence du milieu extérieur.

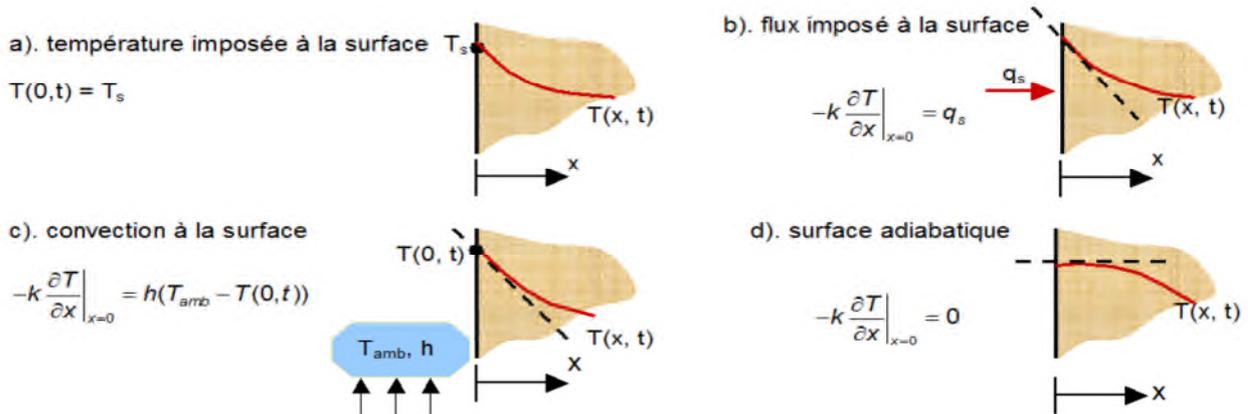


Figure II.1 : Exemples de conditions aux limites

II.5 Modèles Mathématiques la trempe au laser :

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, [4].

II.5.1 Modèles analytiques :

BLACKWELL a examiné analytiquement le phénomène de l'enlèvement explosif de matière traité, observé par DABBY et PAEK, 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 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 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, [4].

II.5.2 Modèles numériques :

CHEUNG. N et al, ont développé un modèle mathématique pour prédire la profondeur de la zone traitée par une source laser de distribution gaussienne indépendante u 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 thermo-physiques dépendantes du temps, ils ont obtenu la profondeur à laquelle le durcissement e produit. Les simulations théoriques sont comparées avec les résultats expérimentaux ou un laser CO2 continu.

GUSTAVO G. et TIEN-CHEN J ont présenté une étude numérique de la distribution de la température suivant le modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY ou la source laser est dépendante du temps exponentiellement, avec une dépendance des propriétés des matériaux avec la température. Les effets de non-linéarité, sont étudiés. L'équation de la conduction de la chaleur gouvernante, les conditions aux limites et la condition initiale sont présentées dans une forme adimensionnelle comme une fonction d'un groupe de paramètres adimensionnelles, La résolution de l'équation gouvernante est une approche de type volumes finis, avec une grille variable qui assure une plus grande résolution dans le domaine près de la limite où la source de la chaleur laser est appliquée. Les effets des paramètres différents ainsi que les propriétés thermiques dépendantes sont étudiées en détail. Les résultats calculés sont comparés avec les études analytiques pour les propriétés thermiques constantes obtenues, pour un matériau semi infini et à dimension finie. De plus, les solutions numériques présentes sont comparées avec les résultats expérimentaux.

BESSROUR .J et al 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, [4].

II.5.3 Modèles de simulation :

✓ Première distinction :

Pratiquement tous les modèles de simulation de la circulation sont dynamiques et ont pour variable indépendante de base le temps.

Il existe cependant deux principaux types de modèles :

- Continus (changement continu d'état avec stimuli continu)
- Discrets (succession d'états changeant brusquement d'un instant à son suivant)

Les modèles discrets peuvent pour leur part être :

- Discrets dans le temps (division du temps en intervalle de longueur constante). Les calculs sont effectués pour chacun des intervalles.
- Discrets dans les événements (division du temps en période s'écoulant entre deux événements connus – les phases d'un feu par exemple). Ce type de modélisation permet de sauver du temps de calcul mais ne peut être avantageusement utilisé que lorsque la circulation change peu d'état ou que la taille du système étudié reste relativement petite

✓ Deuxième distinction :

On peut également classer les modèles selon le niveau de détails qu'il propose. Ainsi, on retrouve :

- Modèles microscopiques (MI). Ils rendent compte, à un haut niveau de détails, des objets du système ainsi que de leurs interactions. (Ex : changement de voie, selon l'interaction entre véhicules impliqués)
- Modèles mésoscopiques (ME). Ils représentent la plupart des objets à un haut niveau de détails mais leurs interactions à un niveau de détails relativement moindre. (Ex : changement de voie, selon densité relative des voies)
- Modèles macroscopiques (MA). Représentent à un faible niveau de détails les objets et leurs interactions. (Ex : flux de circulation par voie, représentation agrégée qui ne visualise pas la manœuvre de changement de voie)

Chapitre II : synthèse bibliographique

Les MI sont relativement plus chers à développer, à faire tourner (en temps) et à mettre à jour.

Ils possèdent potentiellement une plus grande finesse de résultats qui n'est pas forcément atteinte à cause de leur complexité et de la calibration de leurs nombreux paramètres.

Les ME et MA sont moins précis que les MI mais sont moins chers. Ils peuvent parfois produire des résultats pas assez précis ou inadéquats. On peut les utiliser lorsque :

- Les résultats attendus ne sont pas sensibles aux détails microscopiques
- L'échelle d'exécution est trop petite. Trop de temps est nécessaire pour les calculs.
- Les ressources et le temps nécessaires au développement d'un MI sont trop limités.

Le créateur du modèle doit donc choisir le niveau de détails en fonction de ce que l'on désire montrer ou de ce dont l'on veut rendre compte.

✓ Troisième distinction :

Une autre classification permet de distinguer les modèles de simulation selon le type des variables utilisées :

- Modèles déterministes. Aucune variable aléatoire : les relations sont de type mathématique, statistique ou logique.
- Modèles stochastiques. Incluant des fonctions de probabilités.

Par exemple : les modèles de poursuite peuvent être déterministe (le temps de réaction du conducteur est une constante) ou stochastique (le temps de réaction du conducteur est aléatoire)

II.6 : Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons étudié les généralités sur la modélisation et la simulation, leurs principes de fonctionnement, les différents Modèles Mathématiques à la trempe au laser et leurs applications dans le domaine de l'industrie, puis nous nous sommes penchés plus en détail sur la Sensibilité de l'absorptivité au laser à la température, cohérente issue d'émissions

Chapitre II : synthèse bibliographique

stimulées de photons qui est ensuite utilisé directement dans divers applications ou combiné avec certains lasers

Chapitre III

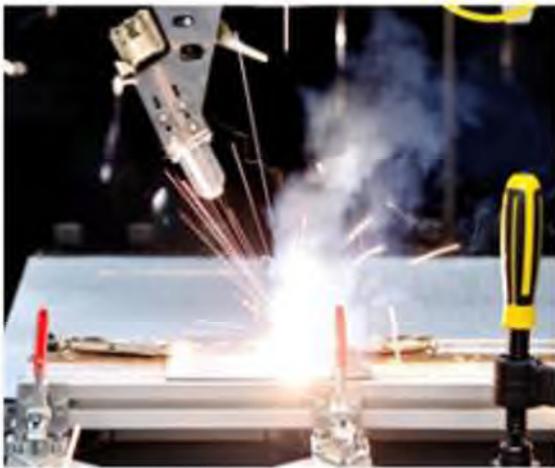
Modélisation Mathématique

III.1 Introduction :

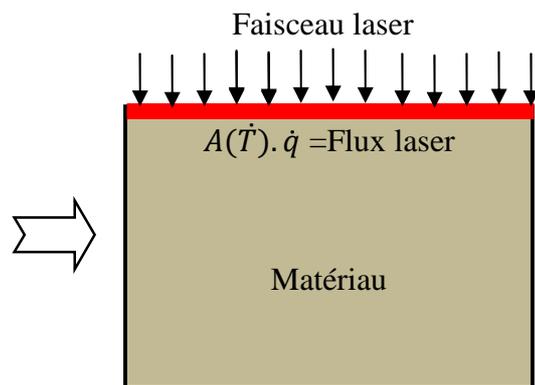
Les équations aux dérivées partielles paraboliques, sont rencontrées dans des nombreuses applications scientifiques. Par mais ces applications le traitement thermique superficiel non linéaire au laser dans les modèles mathématiques qui utilise une équation différentiel parabolique considère-les comme un problème dépendant du temps dans une dimension spatiale. Pour résoudre cette équation différentielle on repose sur la commande (pdepe) de Matlab.

Dans ce chapitre on va étudier la dépendance de la température d'un acier inoxydable « AISI 304 » pour cela en va base sur la commande pdepe sous logiciel Matlab.

III.2 Description du modèle :



Modele physique de trempe superficielle



Représentation mathématique

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

III.2.1 Hypothèses simplificatrices :

Nous développerons notre modèle sur la base des hypothèses suivantes

- Le modèle est considéré en 1D.
- La source laser indépendante du temps (constante)
- Le matériau traité est isotrope homogène supposé comme semi infini.
- Les propriétés thermo physiques du substrat sont indépendantes de la température.

Chapitre III : Modélisation Mathématique

- Les pertes d'énergie par convection et rayonnement sont négligeables.

III.2.2 Formulation des équations :

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

III.2.3 Conditions initiales et aux limites :

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

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

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = A(T(x = 0, t)) \cdot \dot{q} \quad \text{III.4}$$

Dans notre modèle nous utiliserons un acier inoxydable type AISI 304, difficile à durcir par les méthodes classiques, traité par un laser Nd:YAG.

H.Kwon, and all ont mesuré expérimentalement l'évolution de l'absorptivité de cet acier sous l'effet thermique du laser Nd ; YAG ils ont le modéliser comme ci-dessous.

$$A(T(x = 0, t)) = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad \text{III.5}$$

	Température (K)	A	B	C	D
AISI 304	373-823	29.5	0.00579	-0.0000108	0.0000000653
	823-1723	81.9	-0.141	0.00016	-0.0000000241

Tableau III.1 : caractéristique de l'acier inoxydable AISI304

Matériel	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg k)	K (W/m k)	α (m ² /s)
AISI 304	7900	477	15.1	6.17*10 ⁷

Tableau III.2 : propriétés du matériau du substrat utilisé dans le calcul

III.3 : 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, icfun et bcfun 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 :

$$c \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial x} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) + s \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad \text{III.6}$$

La cale d'équations aux dérivées partielles pour $t_0 \leq t \leq t_f$ 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 ≥ 0 .

Dans l'équation III.6 $f \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ est un terme de flux et $s \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ est un terme source. L'accouplement des dérivées partielles par rapport au temps est limité à la multiplication par une matrice diagonale $c \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right)$. 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 :

$$u(x, t_0) = u_0(x) \quad \text{III.7}$$

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

$$p(x, t, u) + q(x, t) f \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{III.8}$$

Chapitre III : Modélisation Mathématique

Elément de q sont identiquement nuls ou jamais zéro. Notez que les conditions aux limites sont exprimées dans le flux f plutôt que $\frac{\partial u}{\partial x}$. En outre, des deux coefficients, seulement p peut dépendre de 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 $x_l = a$ et ur est la solution approximative à la limite droite $x_r = b$. pl et ql sont les vecteurs colonnes correspondant à p et q évalués à x_l , de même pr et qr correspondent aux x_r . Lorsque $m > 0$ et $a = 0$, la bornéité de 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 de la solution vecteur u . L'élément $u_i(j,k) = \text{sol}(j,k,i)$ se rapproche $u_{j'ai}$ à $(t,x) = (\text{tspan}(j), \text{xmesh}(k))$.

$u_i = \text{sol}(j,:,i)$ 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

$du_{j,ai}/dx$ 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 remplacés par des valeurs dans les options, un argument créé avec la fonction `odeset`. Seules certaines options du solveur ODE sous-jacents sont disponibles dans `pdepe` : `RelTol`, `NormControl`, `InitialStepetMaxStep`. 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 où 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.4. Sensibilité de l'absorptivité de l'acier a la température :

Pour mesurer l'absorption à la température ambiante, la sphère d'intégration est couramment utilisée dans des nombreuses études en raison de sa nature précise et polyvalente, [14].

Cependant, pour mesurer les absorptances des métaux à des températures élevées, le signal de sortie passé à travers la sphère d'intégration devient faible, et le rayonnement à haute température des métaux affecte considérablement les données de sortie.

$$A = 1 - R, \quad R = \frac{P - P_T}{P_o} \quad \text{III.9}$$

Où : R est la réflectance de l'échantillon, P est le faisceau réfléchi puissance de l'échantillon, P_T est la puissance affectée par le rayonnement de l'échantillon chauffé, et P_o est la puissance du faisceau de référence, [10-13]. La figure III.2 montre le montage expérimental pour mesurer l'absorbance

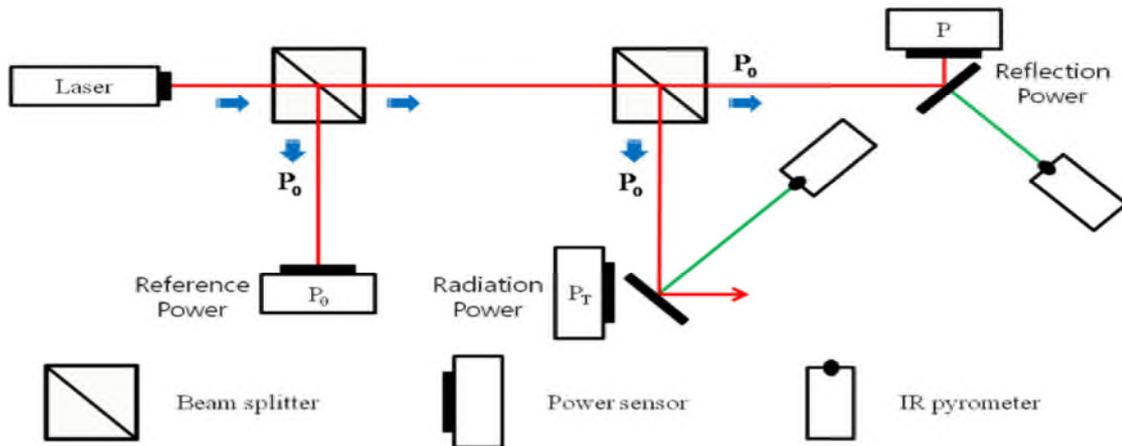


Figure III.2 : Montage expérimental pour mesurer l'absorbance, [14].

Pour les métaux à des températures élevées, les absorbances pour le faisceau laser de 1,07 mm était plus élevé que les absorbances pour faisceau laser de 10,6 mm comme indiqué sur les Figure III.3. À température ambiante, l'absorbance pour un faisceau de 1,07 mm était d'environ 20% plus élevée que pour poutre de 10,6 mm pour SS304 et absorption pour 1,07 mm le faisceau était environ 25% plus élevé que pour le faisceau de 10,6 mm pour Ti. Pour Al, l'absorbance pour un faisceau de 1,07 mm était d'environ 12% plus élevée que pour Poutre de 10,6 mm pour toutes les plages de températures.

L'ordre de l'absorbance pour chaque métal ne variait pas selon la longueur d'onde. Pour un faisceau de 1,07 mm, l'absorbance de Ti était la plus élevée parmi trois métaux, et l'absorption d'Al était la plus faible. De plus, la commande est restée la même avec un faisceau de 10,6 mm: le l'absorbance de Ti était la plus élevée, et l'absorption d'Al était le plus bas, [14].

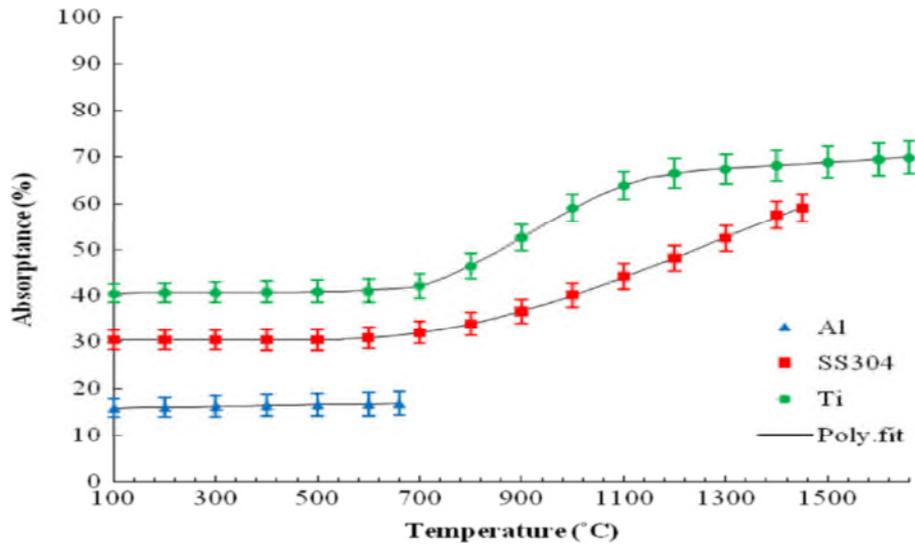


Figure III.3 : Absorption des métaux pour un faisceau de 1,07 mm avec une température allant jusqu'au point de fusion, [14].

III.5 : Résultats et discussion :

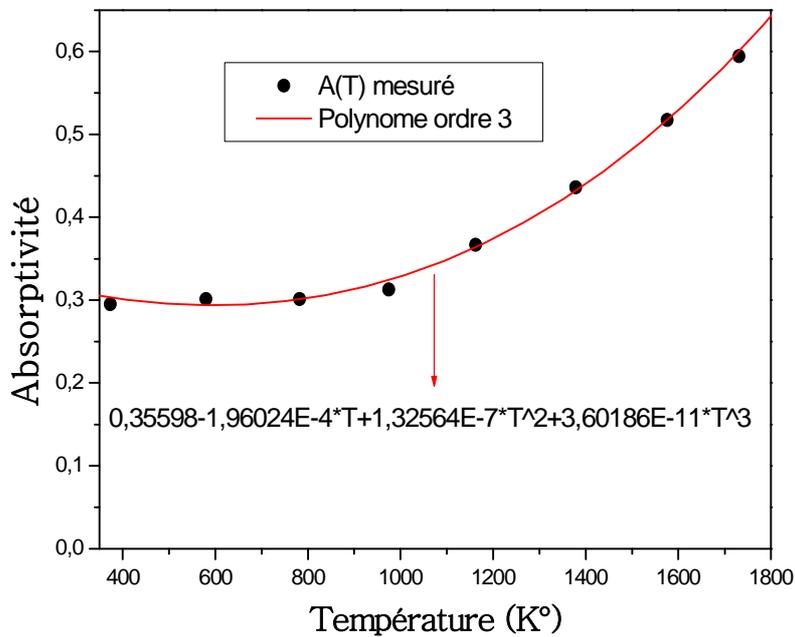


Figure III.4 : polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour l'acier AISI304

Equation de l'absorptivité pour l'acier AISI304 :

Laser Nd : YAG :

$$A(T) = 0.35598 - 1.96024 * 10^{-4} * T + 1.32564 * 10^{-7} * T^2 + 3.60186 * 10^{-11} * T^3$$

La figure III.4 représente une approche théorique sous forme des polynômes d'ordre 3 entre les résultats expérimentale déduire par [48] de l'absorptivité pour l'acier inoxydable AISI304 sous l'effet de laser Nd:YAG.

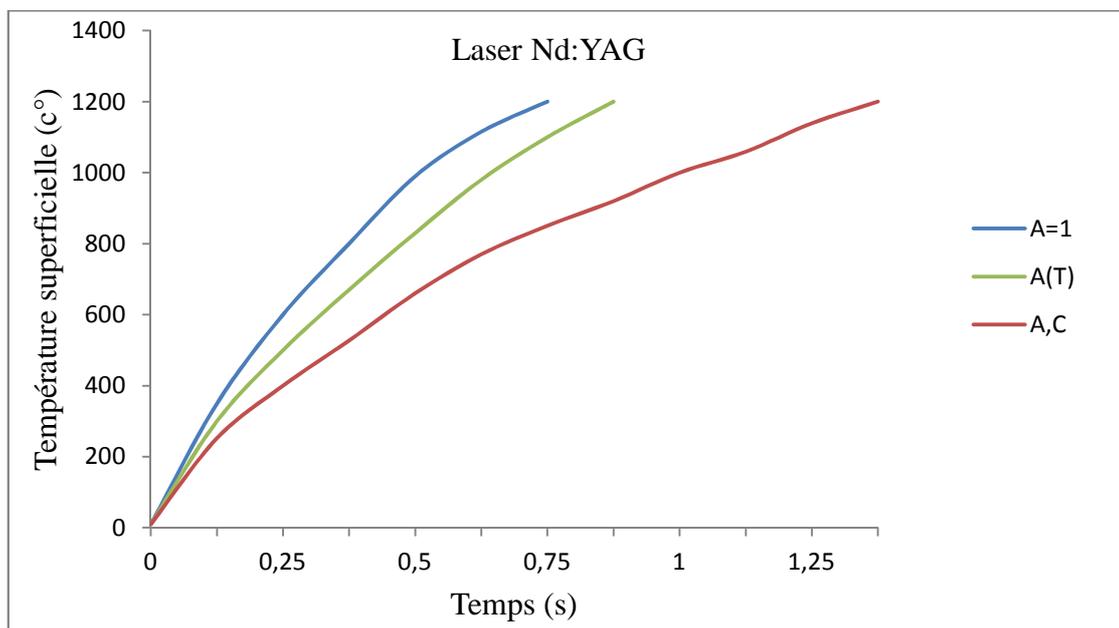


Figure III.5 : profil de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = 1$, $A(T)$, et $A=cst$ pour l'acier AISI304 sous l'effet thermique de laser Nd : YAG.

La figure III.5 représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier inoxydable aisi304 selon trois cas de l'absorptivité, constante, variable, et $A=1$ selon la température superficielle pour le laser Nd : YAG. Une simple analyse pour les trois courbe, en vois que la température superficielle pour le cas de l'absorptivité $A=1$ augmente plus rapide par rapport a l'absorptivité variable est l'absorptivité constante dans un temps réduit, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace.

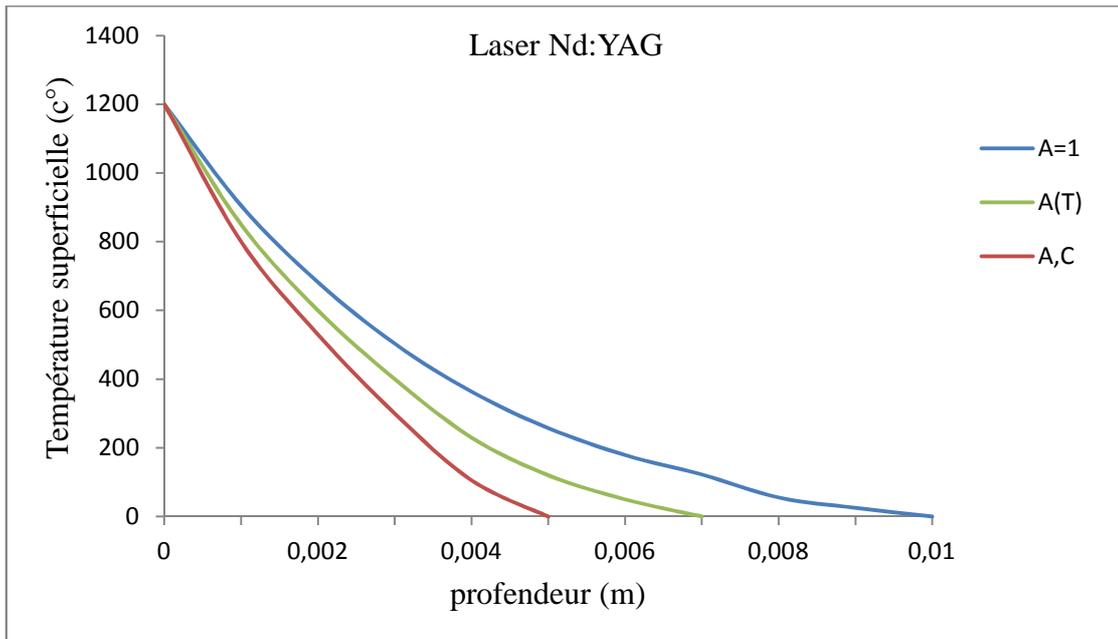


Figure III.6 : profil de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = 1$, $A(T)$, et $A=cst$ pour l'acier AISI304 sous l'effet thermique du laser Nd : YAG

La figure III.6 montre l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase d'échauffement pour les trois modèles de l'absorptivité, constante et variable et $A=1$ en température dans le cas du laser Nd : YAG, en voit que la température superficielle dans le cas où $A=cst$ diminue plus rapide dans une profondeur plus petite par rapport où cas ou $A=1$ et $A(T)$.

Cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce à une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Travail avec $A(T)$:

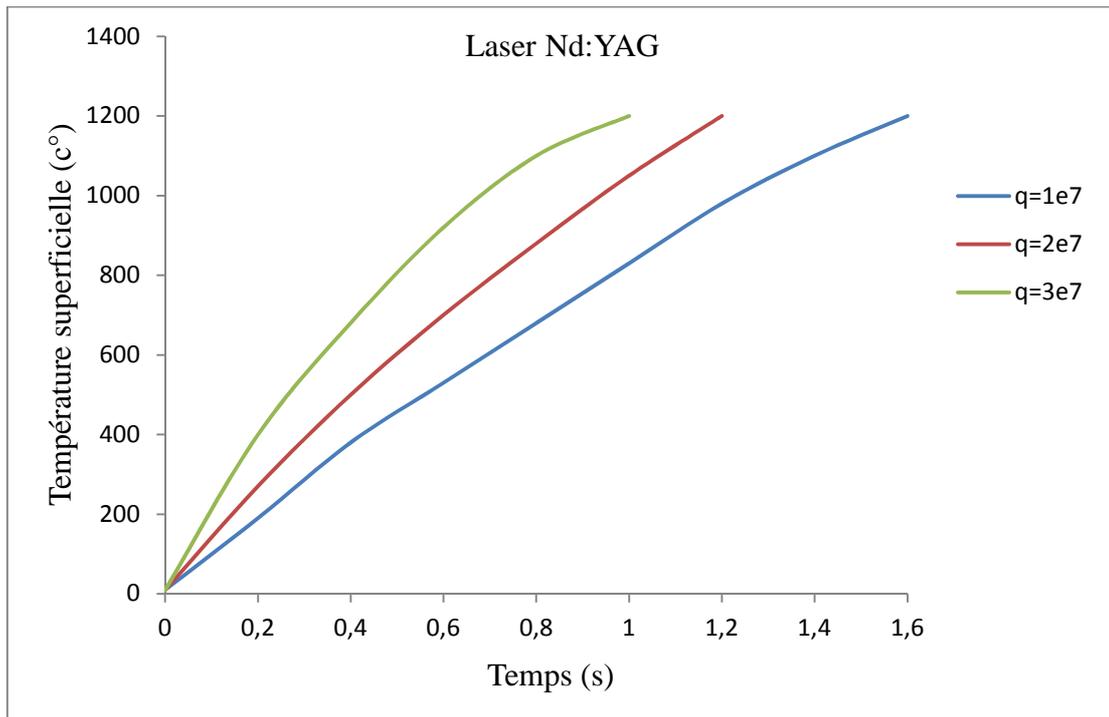


Figure III.7 : profil de température superficielle en fonction du temps obtenue à $q=1 \times 10^7$, $q=2 \times 10^7$ et $q=3 \times 10^7$ pour l'acier inoxydable AISI304

La figure III.7, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier inoxydable AISI304 selon trois cas de l'intensité ($q=1 \times 10^7$, $q=2 \times 10^7$ et $q=3 \times 10^7$) selon la température superficielle pour le laser Nd:YAG. Une simple analyse, en voit que la température de la pièce augmente plus rapidement dans un temps très petit pour $q=1 \times 10^7$. C'est une proportion importante qui peut avoir un résultat rapide et efficace.

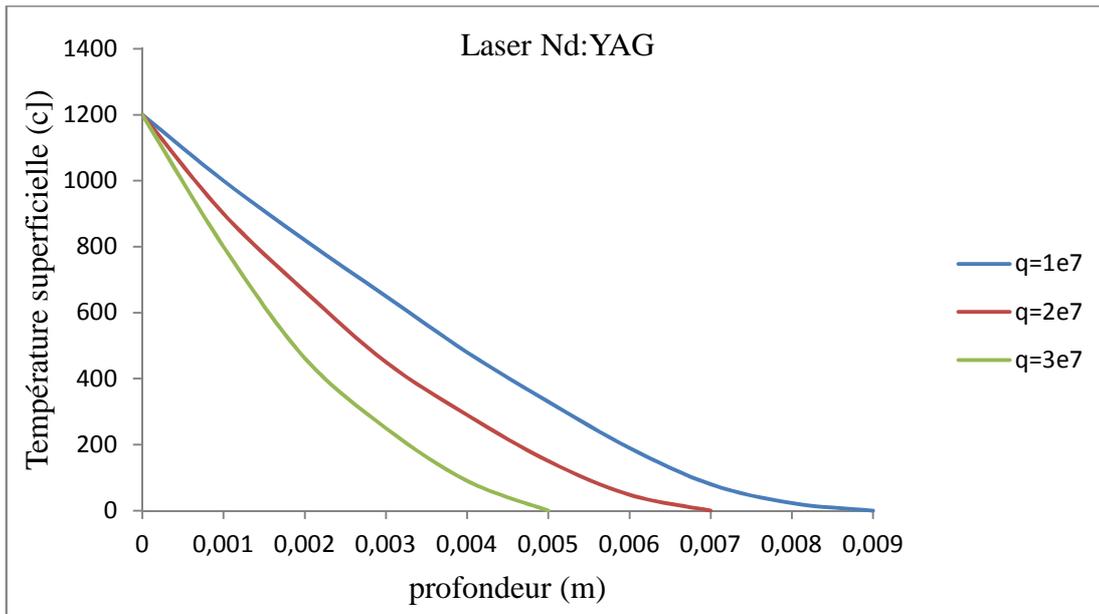


Figure III.8 : profile de température superficielle en fonction de la profondeur obtenue à $q=1*10^7$, $q=2*10^7$ et $q=3*10^7$ pour l'acier inoxydable AISI304

La figure III.8 montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase d'échauffement pour les trois type de l'intensité sous l'effet de laser Nd:YAG, la température diminue plus rapide que le profile pénètre la profondeur de la pièce pour le cas où $q=1*10^7$. Cette variation de pénétration de la température en profondeur de la pièce à une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traitée.

Estimation de la profondeur traitée :

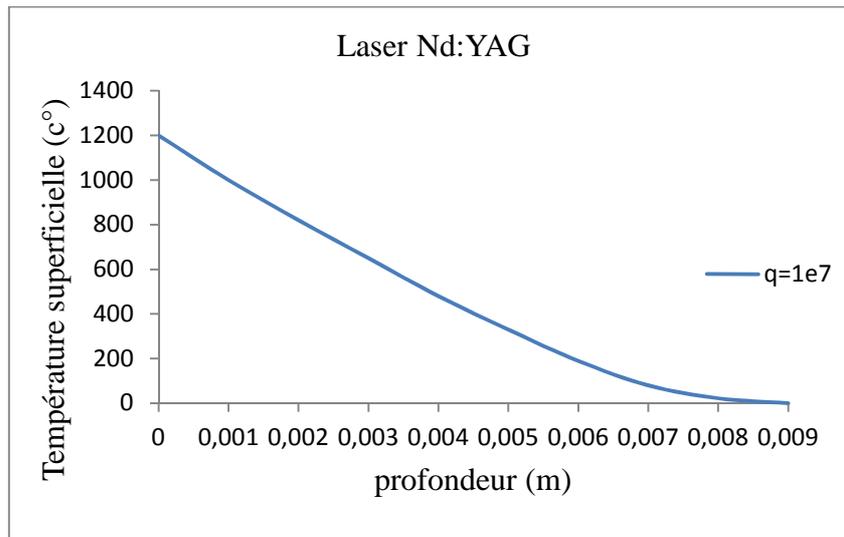


Figure III.9 : profil de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=1*10^7$ pour l'acier inoxydable AISI304

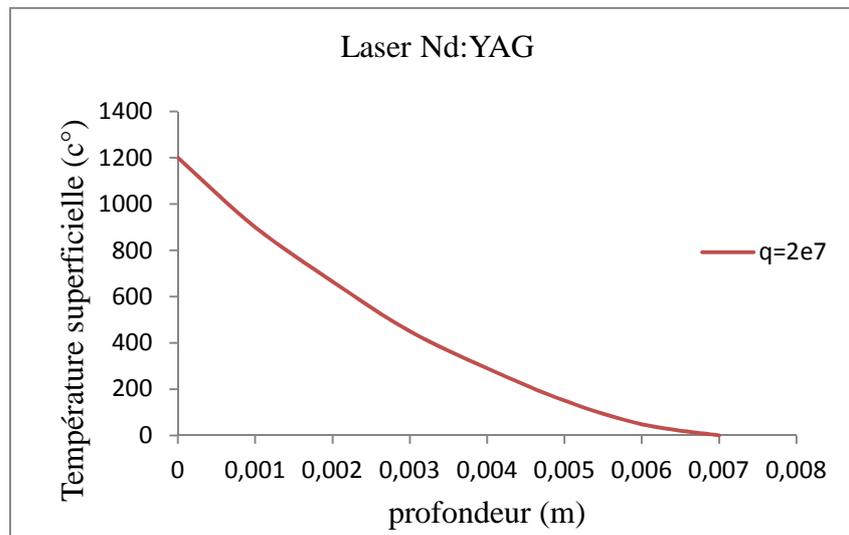


Figure III.10 : profil de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=2*10^7$, pour l'acier inoxydable AISI304.

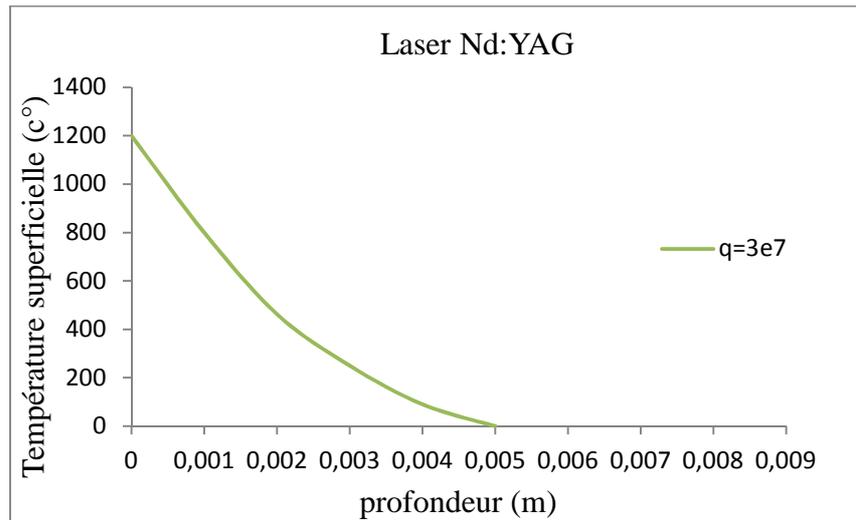


Figure III.11 : profil de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur obtenue à $q=3 \cdot 10^7$, pour l'acier inoxydable AISI304.

	Température (c°)	Profondeur (m)
$q=1 \cdot 10^7$	700°	0.00275
$q=2 \cdot 10^7$		0.00175
$q=3 \cdot 10^7$		0.00125

Tableau III.3 : variation de la profondeur pour $T=700$ pour les trois cas de l'intensité q .

Dans le tableau III.3 on a comparée les trois cas de l'intensité pour une température $T=700^\circ\text{C}$ en fonction de la profondeur, et on voit que la profondeur diminue lorsque on augmente l'intensité. On conclut que pour atteindre des profondeurs plus grandes pour un acier dans un temps court il faut diminuer l'intensité du laser.

III.5 : Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé 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

Chapitre III : Modélisation Mathématique

transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet de flux thermique laser imposé. Pour cela on a utilisé la commande `pdepe` sous Matlab pour résoudre notre modèle mathématique, on a étudié l'acier inoxydable AISI304 sous l'effet de laser Nd : YAG, et on a conclu grâce au résultat que la température superficielle dans le cas de l'absorptivité $A=1$ augmente plus rapidement par rapport à l'absorptivité constante et $A(T)$ dans un temps réduit, l'écart entre les trois cas augmente plus lorsque les profils pénètrent la profondeur de la pièce.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En réponse à la principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concernant l'adoption des conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes physique de l'interaction thermique laser-matière, on a traité le problème de la modélisation du traitement thermique des matériaux en prenant en compte l'effet de la dépendance de l'absorptivité en température.

La plupart des travaux publiés considèrent l'absorptivité comme paramètre constant, après le processus de préparation de la surface, où l'absorptivité dépendante, 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 deux autre cas (A. constante et $A=1$) l'écart entre les trois cas diminuent plus que les profile pénètre la profondeur de la pièce.

On a utilisé la commande `pdepe` sous Matlabe, qui traite mieux se genre de problème, en particulier pour la géométrie simple et régulière de la matière traitée.

Références Bibliographiques

- [1] Schwob, Catherine, and Lucile Julien. "Le laser: principe de fonctionnement." □ Reflets de la physique □ 21 (2010): 12-16.
- [2] <https://www.ulsinc.com/fr/savoir/historique-des-lasers>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Theodore_Maiman.
- [4] BOUTALBI Nadir, «Etude de sensibilité aux paramètres en phase solide lors du traitement thermique par laser» Mémoire de magister, 2007
- [5] Dossier « Le laser : un concentré de lumière □ ». © P.Stroppa/CEA, 2015
- [6] **Avril L.**, «Elaboration de revêtement sur acier inoxydable, simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique», thèse de docteur école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Angers, (décembre 2003),p.242
- [7] BEN NASSER Mohamed, « *Matériaux. Métalliques*. Niveau : 1^{er} année Licence Génie Mécanique. Institut Supérieur des Etudes technologiques Du Kef ; Tunisie 2015
- [8] **Legay. J.M.**, « L'expérience et le modèle, un discours sur la méthode » , INRA Editions, Paris, (1997) , pp.112
- [9] Diplôme Universitaire de Pharmacocinétique de Toulouse *** Année 2007 **
- [10] ASM International Handbook Committee. 1991. Heat Treating. Collection «Metals Handbook », volume 4. Cleveland: American Society for Metals, 2173 p.
- [11] **BANDE, H.** et al. 1991. «Laser surface hardening of AISI 01 steel and its microstructure». Materials Science and Technology, volume 7, number 5, pp. 452-457.
- [12] Belghazi.H, «Modélisation analytique du transfert instationnaire de la chaleur dans un matériau bicouche en contact imparfait et soumis à une source de chaleur en mouvement», Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, (juillet 2008).
- [13] Matlabe logiciel
- [14] <http://www.elsevier.com/locate/optlaseng>

Résumé :

Les lasers ont été largement utilisés pour le traitement des matériaux. De nombreuses applications s'appuyant sur les effets thermiques de l'interaction laser-matière, il devient très important d'obtenir des informations sur le champ de température en fonction des paramètres de traitement et des propriétés des matériaux. A cet effet, plusieurs modèles ont été proposés, à la fois analytique et numérique, des solutions adéquates n'ont pas été trouvées par mesure expérimentale, ce qui encourage les chercheurs à développer plusieurs modèles mathématiques.

Le modèle numérique que nous avons 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.

Des résultats ont été trouvés et discutés pour l'acier inoxydable AISI304 sous l'effet de laser Nd :YAG.

Mots clés : Laser, interaction laser-matière, modélisation, traitement thermique, la trempe laser.

Abstract:

Lasers have been widely used for the processing of materials. With many applications relying on the thermal effects of laser-matter interaction, it becomes very important to obtain information on the temperature field as a function of processing parameters and material properties. To this end, several models have been proposed, both analytical and numerical, adequate solutions have not been found by experimental measurement, which encourages researchers to develop several mathematical models.

The numerical model that we have proposed makes it possible to solve the nonlinear 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.

Results are found and discussed for AISI304 stainless steel under the effect of Nd: YAG laser.

Keywords: Laser, laser-material interaction, modeling, heat treatment, laser hardening.